การวิเคราะห์หาตำแหน่งการติดตั้ง FACTS ที่เหมาะสมในระบบจำหน่าย
โดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาค

ANALYSIS OF OPTIMAL ALLOCATION OF FACTS DEVICES
IN RADIAL DISTRIBUTION SYSTEM BY USING
PARTICLE SWARM OPTIMIZATION METHOD

จักรินทร์ วิเศษยา

JAKKARIN WISETYA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พ.ศ. 2554

การวิเคราะห์หาตำแหน่งการติดตั้ง FACTS ที่เหมาะสมในระบบจำหน่าย
โดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาค

จักรินทร์ วิเศษยา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พ.ศ. 2554

ANALYSIS OF OPTIMAL ALLOCATION OF FACTS DEVICES IN RADIAL DISTRIBUTION SYSTEM BY USING PARTICLE SWARM OPTIMIZATION METHOD

JAKKARIN WISETYA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF THE REQUIREMENTS FOR
THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
IN ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI
2011

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัยขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และข้อความต่าง ๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

นายจักรินทร์ วิเศษยา

COPYRIGHT © 2011 ลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2554

FACULTY OF ENGINEERING คณะวิศวกรรมศาสตร์

RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์หาตำแหน่งการติดตั้ง FACTS ที่เหมาะสมในระบบจำหน่าย โดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาค ANALYSIS OF OPTIMAL ALLOCATION OF FACTS DEVICES IN RADIAL DISTRIBUTION SYSTEM BY USING PARTICLE SWARM OPTIMIZATION METHOD
ชื่อนักศึกษา	นายจักรินทร์ วิเศษยา
รหัสประจำตัว	115270420122-5
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร. กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์
วัน เดือน ปี ที่สอบ	26 กุมภาพันธ์ 2554
สถานที่สอบ	ห้องประชุมชมพูพันธุ์ทิพย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประมุข อุณหเลขกะ)

....กรรมการ
(ดร. บุญยัง ปลั่งกลาง)

....กรรมการ
(ดร. สุรินทร์ แหงมงาม)

....กรรมการ
(ดร. กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์)

……...
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมหมาย ผิวสอาด)
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์หาตำแหน่งการติดตั้ง FACTS ที่เหมาะสมในระบบจำหน่ายโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาค
ชื่อนักศึกษา	นายจักรินทร์ วิเศษยา
รหัสประจำตัว	115270420122-5
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	2553
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร. กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการวิเคราะห์หาตำแหน่งการติดตั้ง FACTS ที่เหมาะสมในระบบจำหน่ายโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาค การติดตั้ง FACTS เข้าไปในระบบไฟฟ้าเพื่อต้องการปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าและความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง

การวิเคราะห์จะใช้แบบจำลองของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE ซึ่งมีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟรวมของโหลดเท่ากับ 3.72 MW และ 2.3 MVar โดยใช้กำลังไฟฟ้าปรากฏฐานเท่ากับ 10 MVA และแรงดันไฟฟ้าฐานเท่ากับ 12.66 kV กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่สูญเสียรวมในระบบจะตั้งอยู่ที่ 221.4346 kW และ 150.1784 kVar การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าจะใช้การคำนวณกระแสแบบย้อนกลับและการคำนวณแรงดันไฟฟ้าแบบไปข้างหน้า และใช้เทคนิคการหาตำแหน่งที่เหมาะสมโดยวิธีกลุ่มอนุภาค ภายใต้เงื่อนไขเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังที่สภาวะโหลดคงที่

ผลการจำลองการทำงานพบว่าแรกเริ่มขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 มีค่าเท่ากับ 0.98 p.u. ส่วนบัสอื่น ๆ ที่อยู่ไกลออกไปแรงดันไฟฟ้าที่บัสจะลดลงโดยเฉพาะที่บัส 33 ซึ่งเป็นบัสปลายสายจะเป็นบัสอ่อนแอที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.881373 p.u. หลังจากใช้เทคนิคการหาค่าความเหมาะสมแล้ว ทำให้ได้ขนาดและตำแหน่งติดตั้ง FACTS ที่เหมาะสม คือ บัสที่ 12 เมื่อติดตั้ง SVC ขนาด 2.4431 MVA และติดตั้ง STATCOM ขนาด 2.4939 MVA เข้าไปที่บัส 12 พบว่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบลดลงแรงดันไฟฟ้าในแต่ละบัสดีขึ้น ระบบมีการจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่ดีขึ้นเพียงพอต่อความต้องการ ซึ่งหากเปรียบเทียบกันระหว่าง FACTS ทั้ง 2 ชนิด การติดตั้ง SVC มีความเหมาะสมมากกว่าการติดตั้ง STATCOM เนื่องจากใช้ขนาดกำลังไฟฟ้าปรากฏที่เล็กกว่า แต่สามารถลดกำลังไฟฟ้าจริงสูญเสียได้ 27.54% และกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสูญเสีย 43.17% ซึ่งมากกว่า STATCOM ที่สามารถลดกำลังไฟฟ้าจริงสูญเสียได้ 27.12% และกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสูญเสีย 41.60% วิทยานิพนธ์นี้ช่วยให้เข้าใจหลักการ

วิเคราะห์และเทคนิคการออกแบบระบบชดเชยกำลังไฟฟ้า เพื่อใช้แก้ปัญหาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบที่ติดตั้ง SVC และ STATCOM เข้าไปในระบบไฟฟ้า และเป็นแนวทางในการวิเคราะห์และพัฒนาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า เพื่อรองรับการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านพลังงานของประเทศในอนาคต

คำสำคัญ : ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล, FACTS, การหาตำแหน่งที่เหมาะสม, วิธีกลุ่มอนุภาค

Thesis Title :	ANALYSIS OF OPTIMAL ALLOCATION OF FACTS DEVICES IN RADIAL DISTRIBUTION SYSTEM BY USING PARTICLE SWARM OPTIMIZATION METHOD
Student Name :	Mr. Jakkarin Wisetya
Student ID :	115270420122-5
Degree Award :	Master of Engineering
Study Program :	Electrical Engineering
Academic Year :	2010
Thesis Advisor :	Dr. Krischonme Bhumkittipich

ABSTRACT

This thesis proposes the analysis of optimal allocation analysis of FACTS devices using particle swarm optimization method (PSO). FACTS device is the compensation device that can inject the real and active power into the power system in order to improve the voltage stability and power system reliability.

The analysis uses the IEEE 33 buses radial distribution system (RDS) for testing system. The total real and reactive power is 3.72 MW and 2.3 MVar, respectively and uses Base MVA is 10 MVA and Base kV is 12.66 kV. The original real and reactive power loss is 221.4346 kW and 150.1784 kVar, respectively. The load flow analysis on distribution use backward-forward sweep methodology and optimization technique by using PSO method.

The simulation results show that the original voltage at bus 1 is 0.98 p.u.. The weak bus is occurred at bus 33 is 0.881317 p.u.. After used the optimization technique, the size of SVC and STATCOM with 2.4431 MVA and 2.4939 MVA, respectively, The power loss is the installed at bus 12 decreased and the voltage bus is increased. The comparison between SVC and STATCOM installation, SVC have aspect appropriate more installed STATCOM. Aspect weak decreased real and reactive power loss is 27.54% and 43.17%. STATCOM decreased real and reactive power loss is 27.12% and 41.60%. This thesis results show solve the voltage stability of power system after installed SVC and STATCOM. The guideline to support the development of energy technology in the future.

Keywords : Radial Distribution Systems, FACTS, Optimal Allocation, PSO Method

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความอนุเคราะห์ ความช่วยเหลือและคำแนะนำจากอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ คือ อาจารย์ ดร. กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์ ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่ายิ่งเพื่อให้คำปรึกษาแนะนำ ตลอดจนชี้แนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูงมาไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประมุข อุณหเลขกะ ดร. บุญยัง ปลั่งกลาง และ ดร. สุรินทร์ แหงมงาม ที่กรุณาให้คำปรึกษาคำแนะนำอันมีค่ายิ่ง ตลอดจนชี้แนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และวัสดุอุปกรณ์ต่าง ๆ รวมถึงเงินทุนสำหรับสนับสนุนในบางส่วนสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ตลอดจนญาติพี่น้องทุกคนที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนแก่ผู้ทำวิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา และรวมถึงพี่ ๆ น้อง ๆ ทีมงานวิจัย ณ ศูนย์วิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้กำลังใจและร่วมแรงร่วมใจอยู่ด้วยกันในการปฏิบัติงานตลอดมา

จักรินทร์ วิเศษยา
26 กุมภาพันธ์ 2554

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์	3
1.3 สมมุติฐาน	3
1.4 ขอบเขต	4
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	4
1.6 ข้อจำกัด	5
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
1.8 ลักษณะรายละเอียด	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้า	12
2.3 เสถียรภาพระบบไฟฟ้า	14
2.4 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า	16
2.5 ปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าเหมาะสมที่สุด	21
2.6 วิธีกลุ่มอนุภาค	25
2.7 อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น	30
2.8 สรุปผลทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	39
บทที่ 3 วิธีดำเนินการ	41
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการโดยใช้โปรแกรม MATLAB M-File	41
3.2 ศึกษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังที่นำมาใช้	43
3.3 การศึกษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าที่มีการติดตั้ง SVC เข้าในระบบ	44

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
	3.4 การศึกษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าที่มีการติดตั้ง STATCOM เข้าในระบบ	44
	3.5 สรุป	45
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์		46
	4.1 การปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายที่ติดตั้ง SVC	49
	4.2 การปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายที่ติดตั้ง STATCOM	52
	4.3 สรุป	55
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ		57
	5.1 สรุปผล	57
	5.2 ข้อเสนอแนะ	59
เอกสารอ้างอิง		60
ภาคผนวก		
	ก.1 ข้อมูลสาขาต่าง ๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE	63
	ก.2 ข้อมูลบัสต่าง ๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE	64
	ข.1 โปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วย MATLAB M-File	67
	ข.2 โปรแกรมการหาตำแหน่งติดตั้ง SVC ที่เหมาะสมโดยใช้ PSO	73
	ข.3 โปรแกรมการหาตำแหน่งติดตั้ง STATCOM ที่เหมาะสมโดยใช้ PSO	89
	ค. ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่	105
ประวัติผู้เขียน		128

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 ข้อมูลของ SVC ขนาด 2.4431 MVA ที่ติดตั้งในตำแหน่งของบัสที่ 12 44

3.2 ข้อมูลของ STATCOM ขนาด 2.4939 MVA ที่ติดตั้งในตำแหน่งของบัสที่ 12 45

4.1 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE 48

4.2 ผลการจำลองค่าต่าง ๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE หลังติดตั้ง SVC 50

4.3 การหาตำแหน่งติดตั้ง SVC ที่เหมาะสมโดยใช้ PSO 52

4.4 ผลการจำลองค่าต่าง ๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE หลังติดตั้ง STATCOM 53

4.5 การหาตำแหน่งติดตั้ง STATCOM ที่เหมาะสมโดยใช้ PSO 55

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ไดอะแกรมของระบบไฟฟ้ากำลัง	1
2.1 โครงข่ายระบบไฟฟ้าแบบเรเดียล	13
2.2 โครงข่ายระบบไฟฟ้าแบบลูป	13
2.3 การจำแนกเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า	14
2.4 ลำดับขั้นการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีแบบย้อนกลับและไปข้างหน้า	17
2.5 การจัดลำดับสายส่ง	18
2.6 กระแสในสายส่งของระบบไฟฟ้าแบบเรเดียล	19
2.7 การคำนวณค่ากระแสในสายส่งในแต่ละช่วงแบบย้อนกลับ	20
2.8 การคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหนดแบบไปข้างหน้า	20
2.9 วิวัฒนาการของวิธีปัญญาประดิษฐ์	26
2.10 การอยู่รวมกันเป็นฝูงของนกและปลา	27
2.11 การเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาค	27
2.12 ขั้นตอนการคำนวณหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาค	30
2.13 อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น	31
2.14 ลักษณะการติดตั้งของ SVC	31
2.15 Thyristor Controlled Reactor, TCR	32
2.16 Thyristor Switched Capacitor, TSC	32
2.17 ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของ SVC	33
2.18 แบบจำลองของ SVC	33
2.19 คุณลักษณะเฉพาะแรงดันและกระแสไฟฟ้าของ SVC	34
2.20 การจำกัดขอบเขตการควบคุมในแบบจำลองสภาวะคงตัวของของ SVC	35
2.21 ลักษณะการติดตั้งของ STATCOM	36
2.22 ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของ STATCOM	37
2.23 แบบจำลองของ STATCOM	37
2.24 คุณลักษณะเฉพาะแรงดันและกระแสไฟฟ้าของ STATCOM	38
2.25 การจำกัดขอบเขตการควบคุมในแบบจำลองสภาวะคงตัวของของ STATCOM	39
3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB M-File	42
3.2 แผนภาพเส้นเดียวของแบบจำลองระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐานIEEE	43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.3 แบบจำลองระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE หลังติดตั้ง SVC 44

3.4 แบบจำลองระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE หลังติดตั้ง STATCOM 45

4.1 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่เหมาะสมของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE 46

4.2 ค่าโดยประมาณกับค่ากำลังไฟฟ้าจริงสูญเสียที่ต้องการของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE 46

4.3 ขนาดกระแสที่สาขาต่าง ๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE 47

4.4 ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่าง ๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE 47

4.5 ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่าง ๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE หลังติดตั้ง SVC 49

4.6 ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่าง ๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE หลังติดตั้ง STATCOM 53

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

B_e	ซัสเซ็บแตนซ์ของอุปกรณ์ FACTS
B_{min}	ซัสเซ็บแตนซ์ต่ำสุดของอุปกรณ์ FACTS
B_{max}	ซัสเซ็บแตนซ์สูงสุดของอุปกรณ์ FACTS
C	คาปาซิเตอร์
C_1,C_2	ค่าคงที่ความเร่ง
$Gbest_d$	ตำแหน่งที่ดีที่สุดในทุก ๆ อนุภาคของตัวแปร
G_C	คอนดักแตนซ์ของอุปกรณ์ FACTS
$g_{i,j}$	ความนำไฟฟ้าจากบัส i ไปยังบัส j
I	กระแสที่ไหลระหว่างระบบกับอุปกรณ์ FACTS
I_C	กระแสที่ไหลของคาปาซิเตอร์
I_L	กระแสที่ไหลของอินดักเตอร์
I_{min}	กระแสต่ำสุด
I_{max}	กระแสสูงสุด
J	กระแสในสาย
k	รอบการคำนวณทั้งหมด
L	อินดักเตอร์
L_1	โหนดต้นทาง
L_2	โหนดปลายทาง
m	ค่ามอดูเลชั่นของอุปกรณ์แปลงผัน
N_B	จำนวนบัส
N_C	จำนวนตัวอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟในระบบ
N_G	จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดในระบบ
N_L	จำนวนสายส่งทั้งหมด
N_T	จำนวนของหม้อแปลงที่ติดตั้งในระบบ
P	กำลังไฟฟ้าจริง
$Pbest_{id}$	ตำแหน่งที่ดีที่สุดของอนุภาค i ของตัวแปร d
$P_{D,i}$	ความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส i
$P_{G,i}$	กำลังไฟฟ้าจริงผลิตที่บัส i
$P_{G,i}^{min}$	ขอบเขตของกำลังไฟฟ้าจริงต่ำสุด
$P_{G,i}^{max}$	ขอบเขตของกำลังไฟฟ้าจริงสูงสุด

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

P_i	กำลังไฟฟ้าจริงของอุปกรณ์ FACTS
P_{loss}	กำลังไฟฟ้าจริงที่สูญเสียในสายส่งทั้งหมด
$P(x)$	ฟังก์ชันปรับโทษ
Q	กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ
$Q_{comp,i}^{min}$	ขอบเขตกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟต่ำสุด
$Q_{comp,i}^{max}$	ขอบเขตกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสูงสุด
$Q_{D,i}$	ความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่บัส i
$Q_{G,i}$	กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟผลิตที่บัส i
Q_{loss}	กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่สูญเสียในสายส่งทั้งหมด
Q_{SVC}	กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของ SVC
ΔQ_{SVC}	ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเปลี่ยนแปลงของ SVC
R	ความต้านทานของสาย
S	กำลังไฟฟ้าปรากฏ
S_i	กำลังไฟฟ้าปรากฏที่โหนด i
t	รอบการคำนวณปัจจุบัน
T_i^{min}	ขอบเขตแทปหม้อแปลงต่ำสุด
T_i^{max}	ขอบเขตแทปหม้อแปลงสูงสุด
V	แรงดันไฟฟ้าที่บัส
V_{ac}	แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
V_{dc}	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
$V_{dc_{min}}$	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่ำสุด
$V_{dc_{ref}}$	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอ้างอิง
V_i	แรงดันไฟฟ้าที่บัส i
$V_i^{(k-1)}$	แรงดันไฟฟ้าที่โหนด i ณ รอบคำนวณที่ k-1
V_{id}^{t}	ความเร็วในการเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาค i ของตัวแปร d ในรอบการคำนวณที่ t
V_{id}^{t+1}	ความเร็วในการเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาค i ของตัวแปร d ในรอบการคำนวณที่ t+1
V_i^{min}	ขอบเขตแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด
V_i^{max}	ขอบเขตแรงดันไฟฟ้าสูงสุด

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

V_j	แรงดันไฟฟ้าบัสที่ j
$V_j^{(k)}$	แรงดันไฟฟ้าที่บัส j ในรอบการคำนวณที่ k
$V_j^{(k-1)}$	แรงดันที่ไฟฟ้าบัส j ในรอบการคำนวณที่ k-1
$\Delta V_j^{(k)}$	ค่าความคลาดเคลื่อนแรงดันไฟฟ้าที่บัส j หลังการคำนวณในรอบที่ k
V_{min}	แรงดันไฟฟ้าต่ำสุด
V_{max}	แรงดันไฟฟ้าสูงสุด
V_{ref}	แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง
W	ค่าถ่วงน้ำหนัก
W_{min}	ขอบเขตล่างของค่าถ่วงน้ำหนัก
W_{max}	ขอบเขตบนของค่าถ่วงน้ำหนัก
X	รีแอคแตนซ์ของสาย
X_C	คาปาซิแตนซ์ของ SVC
X_{id}^t	ตำแหน่งของอนุภาค i ของตัวแปร d ในรอบการคำนวณที่ t
X_{id}^{t+1}	ตำแหน่งของอนุภาค i ของตัวแปร d ในรอบการคำนวณที่ t+1
X_L	รีแอคแตนซ์ของ SVC
X_{SL}	รีแอคแตนซ์ของ SVC ในสภาวะสมดุล
$X(x)$	เทอมปรับโทษ
Y_i	ผลรวมของแอตมิตแตนซ์ส่วนลงดินทั้งหมดที่โหนด i
$Y_{i,j}$	ขนาดแอตมิตแตนซ์บัส i ไปยังบัส j
Z_L	ค่าอิมพีแดนซ์อนุกรมของสายส่งช่วง L
α	มุมจุดชนวนสวิตช์
α_{min}	มุมจุดชนวนสวิตช์ต่ำสุด
α_{max}	มุมจุดชนวนสวิตช์สูงสุด
δ	มุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัส
δ_i	มุมแรงดันไฟฟ้าบัสที่ i
δ_j	มุมแรงดันไฟฟ้าบัสที่ j
ε	ค่าความคลาดเคลื่อนที่พอยอมรับได้
ρ	ตัวประกอบการปรับโทษ
β	มุมเฟส
$\theta_{i,j}$	มุมแอตมิตแตนซ์บัส i ไปยังบัส j

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

AS	Ant System
BFS	Breadth First Search
BW	Backward
D-FACTS	Distribution Flexible AC Transmission System
D-LFB	Decoupled Line Flow Based
DSTATCOM	Distribution Static Synchronous Compensator
ES	Expert System
FACTS	Flexible AC Transmission line System
FLFBA	Fast Line Flow Based Algorithm
FW	Forward
GA	Genetic Algorithm
IPFC	Interline Power Flow Controller
KCL	Kirchhoff Current Law
KVL	Kirchhoff Voltage Law
LFB	Line Flow-Based
N-R	Newton–Raphson
OPF	Optimal Power Flow
PF	Power Flexibility
PQ	Power Quality
PR	Power Reliability
PS	Power Stability
PSO	Particle Swarm Optimization
p.u.	Per Unit
PWM	Pulse Wide Modulation
RBTS	Roy Billinton Test System
RDS	Radial Distribution System
SA	Simulated Annealing
SSSC	Static Synchronous Series Capacitor
STATCOM	Static Synchronous Compensator
SVC	Static VAR Compensator

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

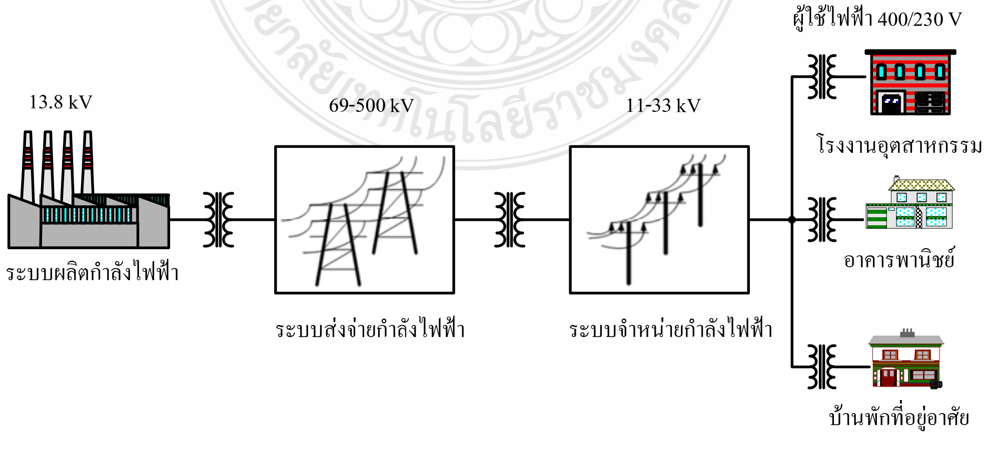
TCPAR	Thyristor Switched Capacitor
TCVR	Thyristor Controlled Phase Angle Regulator
TCR	Thyristor Controlled Voltage Regulator
TCSC	Thyristor Controlled Reactor
TSC	Thyristor Controlled Series Capacitor
TS	Tabu Search
UPFC	Unified Power Flow Controller

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยมีความต้องการใช้พลังงานที่เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการจัดสรรพลังงานต้องจัดสรรพลังงานเพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการที่เพิ่มสูงขึ้น การจัดสรรพลังงานต้องพิจารณาทั้งทางด้านเศษฐศาสตร์และความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งพลังงานที่ให้ความสะดวกในการใช้และมีความสำคัญมากที่สุด คือ พลังงานไฟฟ้า เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าเป็นอีกเรื่องหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงเพราะมีผลกระทบต่อความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยเมื่อพิจารณาถึงหลักการออกแบบระบบไฟฟ้ากำลังที่ดีควรจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติที่สำคัญ ซึ่งจำเป็นที่จะต้องใช้ในการออกแบบระบบไฟฟ้ากำลังประกอบด้วย คุณภาพของกำลังไฟฟ้า (Power Quality, PQ) เสถียรภาพของกำลังไฟฟ้า (Power Stability, PS) ความเชื่อถือได้ของกำลังไฟฟ้า (Power Reliability, PR) และความยืดหยุ่นของกำลังไฟฟ้า (Power Flexibility, PF) [1] ส่วนประกอบของระบบไฟฟ้ากำลังมี 3 ส่วน คือ ระบบผลิตกำลังไฟฟ้า ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า โดยทั่วไประบบการจ่ายกำลังไฟฟ้าจะเริ่มจากระบบผลิตไฟฟ้า ซึ่งมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตกำลังไฟฟ้าที่มีระดับแรงดันไฟฟ้า 13.8 kV ผ่านหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เพื่อเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าให้มีระดับสูง 69-500 kV จ่ายผ่านระบบส่งจ่ายไฟฟ้า จากนั้นจะถูกแปลงให้มีระดับแรงดันไฟฟ้าลดลงเหลือ 11-33 kV ที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยโดยหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่สถานีไฟฟ้าย่อยและจ่ายผ่านสายป้อนในระบบจำหน่ายไฟฟ้า จากนั้นจึงแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าให้ต่ำลงเหลือ 400/230 V โดยหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า และเดินสายไฟแรงต่ำไปสู่ผู้ใช้ไฟ [2] ซึ่งไดอะแกรมของระบบไฟฟ้ากำลังแสดงดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ไดอะแกรมของระบบไฟฟ้ากำลัง

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยทั่วไปมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียมากกว่าระบบส่งจ่ายไฟฟ้า เนื่องจากเป็นระบบที่มีค่าอัตราส่วนระหว่างความต้านทานกับความต้านทานเหนี่ยวนำ (R/X Ratio) ค่อนข้างสูง ทั้งยังเป็นระบบที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำและมีกระแสไหลในสายมากกว่าระบบส่งจ่ายไฟฟ้า [3] ระบบจำหน่ายไฟฟ้าเป็นระบบที่เชื่อมต่อระหว่างระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากับผู้ใช้ไฟฟ้าถือเป็นระบบที่มีความสำคัญ เพราะส่งผลกระทบกับผู้ใช้ไฟฟ้าโดยตรง เมื่อกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าสูงจะส่งผลให้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าลดลง ทำให้ต้องเพิ่มการลงทุนเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขายให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าและเป็นการเพิ่มความมั่นคงให้กับระบบไฟฟ้า ดังนั้นจึงต้องมีการวางแผนหาวิธีปรับปรุงระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย การปรับปรุงระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียนั้นมีหลายวิธี เช่น การจัดเรียงโครงสร้างการจ่ายไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าใหม่ ซึ่งเป็นวิธีการปรับเปลี่ยนรูปแบบการจ่ายไฟฟ้าโดยการหาตำแหน่งเปิดและปิดสวิตช์ถ่ายโอน การติดตั้งหม้อแปลงปรับระดับแรงดันไฟฟ้า เพื่อเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าในพื้นที่ที่มีการเดินสายป้อนของระบบจำหน่ายค่อนข้างไกล เป็นการแก้ปัญหาแรงดันไฟฟ้าตกที่ปลายสาย การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าในจุดที่มีความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าสูง การติดตั้งคาปาซิเตอร์เพื่อช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเข้าสู่ระบบ และการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น (Flexible AC Transmission System, FACTS) เพื่อช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเข้าระบบ และแก้ปัญหาตัวประกอบกำลัง [4]

เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า (Voltage Stability) ถือว่าเป็นเรื่องที่มีความสำคัญต่อระบบไฟฟ้าอย่างมาก มีผลกระทบต่อความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเกิดสภาวะแรงดันไฟฟ้าพังทลาย ปกติการศึกษาเสถียรภาพจะพบมากสำหรับการวิเคราะห์แบบสถิต เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า ในการวิเคราะห์แบบพลวัตส่วนใหญ่ที่ศึกษาเฉพาะในรูปคุณภาพไฟฟ้า โดยระบบไฟฟ้าที่ดีนั้นควรจะมีระดับแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมกับความต้องการใช้ไฟฟ้าและไม่ส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ ส่วนของโหลดทางไฟฟ้านั้นจะดูค่าจากสถานีไฟฟ้าว่ามีโหลดเพิ่มมากขึ้นเท่าไร หากสถานีไหนมีค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดก่อนถึงสภาวะแรงดันไฟฟ้าพังทลายที่น้อย สถานีนั้น ๆ จะมีความเสี่ยงที่สูงกว่าสถานีที่มีค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดก่อนถึงสภาวะแรงดันไฟฟ้าพังทลายที่มากกว่า หากทำการเพิ่มเสถียรภาพในระบบที่มีความเสี่ยงสามารถทำได้โดยเพิ่มสถานีผลิตไฟฟ้า ติดตั้งอุปกรณ์ชดเชย หรือรับซื้อไฟฟ้า [5]

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นนั้นการเลือกวิธีการปรับปรุงระบบจำหน่ายไฟฟ้าไปใช้นั้นขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการลงทุนและสภาพพื้นที่ วิธีหนึ่งที่นิยมนำมาใช้ในการปรับปรุงระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย คือ วิธีการติดตั้ง FACTS เนื่องจากสามารถปรับการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเข้าสู่ระบบและแก้ปัญหาตัวประกอบกำลังในระบบได้อีกด้วย ในปัจจุบันการวางแผนติดตั้ง FACTS ต้องคำนึงถึงองค์ประกอบหลายอย่าง โดยวิธีที่ใช้วิเคราะห์ปัญหานี้ได้มีการนำเสนอหลายวิธี เช่น วิธีเชิงวิเคราะห์ วิธีเชิงตัวเลข และวิธีปัญญาประดิษฐ์ เป็นต้น วิธีปัญญาประดิษฐ์ได้รับความนิยม

วิทยานิพนธ์นี้จะเน้นการวิเคราะห์หาตำแหน่งการติดตั้ง FACTS ที่เหมาะสมในระบบจำหน่าย ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้เลือกอุปกรณ์ FACTS 2 ชนิด คือ แบบต่อขนาน (Static VAR Compensator, SVC) และ (Static Synchronous Compensator, STATCOM) เพื่อช่วยในการแก้ไขปัญหาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าและความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง ในส่วนของการหาค่าความเหมาะสมใช้วิธีกลุ่มอนุภาค ขณะที่กำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบและแรงดันไฟฟ้าที่จุดโหลดคำนวณได้จากการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแบบกระแสย้อนกลับและแรงดันไฟฟ้าแบบไปข้างหน้า โดยพิจารณาถึงการทำงานของบัสที่ถูกติดตั้งเข้าไปแล้วระบบมีการจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่เพียงพอหรือไม่ ถ้าติดตั้งเข้าไปแล้วการจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่บัสนั้นไม่เพียงพอ ก็จะต้องทำการชดเชยกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ เพื่อเพิ่มคุณภาพและเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังให้ดียิ่งขึ้น ในส่วนการวิเคราะห์แบบจำลองของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล ซึ่งกระทำด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาตำแหน่งติดตั้ง SVC และ STATCOM ที่เหมาะสม ได้ทำการทดสอบกับแบบจำลองของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE

1.2.2 เพื่อศึกษาวิธีกลุ่มอนุภาคในการแก้ปัญหาการหาคำตอบที่ดีที่สุด

1.2.3 เพื่อศึกษาหาตำแหน่งการติดตั้ง SVC และ STATCOM ที่เหมาะสมของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE โดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาค

1.3 สมมุติฐาน

การศึกษาหาตำแหน่งการติดตั้ง SVC และ STATCOM ที่เหมาะสมในระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE โดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาค เป็นการหาตำแหน่งการติดตั้ง SVC และ STATCOM ที่เหมาะสมในระบบจำหน่าย และวางแผนเพื่อรักษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังให้ดีขึ้น

1.4 ขอบเขต

1.4.1 สามารถวิเคราะห์ปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE

1.4.2 สามารถแก้ปัญหาการหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาค

1.4.3 สามารถกำหนดตำแหน่งการติดตั้ง SVC และ STATCOM ที่เหมาะสมของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE โดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาค

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ทำการศึกษาข้อมูลเพื่อนำมาวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE เพื่อหาตำแหน่งการติดตั้ง SVC และ STATCOM ที่เหมาะสมโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาคและหลังจากที่ทำการติดตั้ง SVC และ STATCOM เข้าไปในระบบจำหน่ายแล้ว โดยจะมีขั้นตอนในการศึกษาดังต่อไปนี้

1.5.1 การศึกษาทฤษฎีและรวบรวมข้อมูลเบื้องต้น

1. ศึกษาที่มาของปัญหาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า การกำหนดตำแหน่งการติดตั้งFACTS ที่เหมาะสมในระบบจำหน่าย

2. ศึกษาอุปกรณ์ SVC และ STATCOM ที่จะใช้ติดตั้งเพื่อแก้ปัญหาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่าย

1.5.2 การวิเคราะห์แบบจำลองระบบ

1. วิเคราะห์แบบจำลองของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อหาตำแหน่งการติดตั้ง SVC และ STATCOM ที่เหมาะสมในระบบ

2. วิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าเมื่อติดตั้ง SVC และ STATCOM เข้ากับระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE แล้ว

1.5.3 การออกแบบระบบ

1. กำหนดตำแหน่งการติดตั้ง SVC และ STATCOM ที่เหมาะสมของในระบบจำหน่ายของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE

2. ออกแบบระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าเพื่อแก้ไขเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า

1.5.4 ประเมินผลการทำงานของงานวิจัย

1. ทำการทดสอบระบบ

2. เก็บผลการทดสอบของระบบ

3. ประเมินผลระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าสำหรับการติดตั้ง SVC และ STATCOM ในระบบจำหน่าย พร้อมทั้งปรับปรุงเพื่อเสถียรภาพที่ดีขึ้นของระบบ

1.5.5 จัดทำรายงานการวิจัยและสรุปผลการดำเนินงาน

1.6 ข้อจำกัด

วิทยานิพนธ์นี้เน้นการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า วิทยานิพนธ์นี้ไม่เน้นการพิจารณาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังทางด้านอื่น ๆ โดยกำหนดกรอบในการวิเคราะห์ดังนี้

1.6.1 ระบบที่นำมาทดสอบเป็นระบบสามเฟสแบบสมดุล

1.6.2 พิจารณาเฉพาะการทำงานในช่วงเวลาคงตัว

1.6.3 แบบจำลองโหลดจะใช้เป็นค่ากำลังคงที่

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 เข้าใจถึงปัญหาของการกำหนดตำแหน่งการติดตั้ง SVC และ STATCOM ที่เหมาะสมเข้ากับระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE

1.7.2 เข้าใจถึงการวิเคราะห์และการแก้ปัญหาด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการกำหนดตำแหน่งการติดตั้ง SVC และ STATCOM ที่เหมาะสมเข้ากับระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE โดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาค

1.7.3 เข้าใจถึงปัญหาหลักการวิเคราะห์และเทคนิคการออกแบบระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าเพื่อใช้แก้ปัญหาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบที่ติดตั้ง SVC และ STATCOM เข้ากับระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE

1.7.4 เป็นแนวทางในการวิเคราะห์และพัฒนาเสถียรภาพด้านอื่น ๆ ของระบบจำหน่ายสำหรับการเพิ่มคุณภาพของกำลังไฟฟ้าในระบบให้ดีขึ้นเพื่อรองรับการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านพลังงานของประเทศในอนาคต

1.8 ลักษณะรายละเอียด

การนำเสนอวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีอยู่ด้วยกัน 5 บท คือ บทที่ 1 จะกล่าวถึงปัญหา ความเป็นมาและความสำคัญในการแก้ปัญหา โดยมุ่งเน้นไปที่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล ต่อมาจะกล่าวถึงวัตถุประสงค์ สมมุติฐาน ขอบเขต ขั้นตอนในการดำเนินงาน ข้อจำกัด และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับตามลำดับ บทที่ 2 ศึกษาวรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า ทฤษฎีและสมการทางคณิตศาสตร์การไหลของกำลังไฟฟ้า ปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด วิธีกลุ่มอนุภาค และการศึกษาอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น FACTS ทั้ง 2 ชนิด คือ แบบต่อขนาน SVC และ STATCOM เพื่อเป็นแนวทางนำมาใช้ในวิทยานิพนธ์ บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิทยานิพนธ์ โดยการนำข้อมูลต่าง ๆ ของระบบจำหน่ายมาใช้ในโปรแกรม MATLAB M-File เพื่อทำการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าจากกราฟและผลการจำลองระบบจำหน่าย ดูว่าบัสไหนของระบบจำหน่ายที่ติดตั้ง FACTS เข้าไปแล้ว กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสูญเสียต่ำ

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า เป็นระบบที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำและมีกระแสไหลในสายมากกว่าระบบส่งจ่ายไฟฟ้า เป็นระบบที่เชื่อมต่อระหว่างระบบส่งจ่ายกับผู้ใช้ไฟฟ้าจึงเป็นระบบที่มีความสำคัญ เพราะส่งผลกระทบกับผู้ใช้ไฟฟ้าโดยตรง เมื่อกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าสูง จะส่งผลให้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าลดลง ทำให้ต้องเพิ่มการลงทุนเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขายให้กับผู้ใช้ไฟฟ้า และเป็นการเพิ่มความมั่นคงให้กับระบบไฟฟ้าที่ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพกำลังไฟฟ้าในระบบไป ซึ่งแก้ไขโดยการติดตั้ง FACTS เข้าไปที่ระบบจำหน่าย จึงนำไปสู่การวิจัยและพัฒนาระบบดังกล่าวขึ้น โดยมีส่วนประกอบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในลำดับต่อไปนี้

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ธวัช สิริสังกาส [6] ได้นำเสนอเกี่ยวกับการหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดคาปาซิเตอร์แบงค์ที่เหมาะสม เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าพร้อมทั้งคำนึงถึงความไม่เป็นเชิงเส้นของโหลดโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาค ซึ่งมาจากปัญหาการขาดเสถียรภาพกำลังไฟฟ้า การติดตั้งคาปาซิเตอร์จะช่วยชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่เป็นสิ่งจำเป็นในการวางแผนในระบบจำหน่าย เนื่องจากเป็นการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบไฟฟ้า ปัญหาการติดตั้งคาปาซิเตอร์ มี 2 ด้าน อย่างแรก คือ ตำแหน่ง และอย่างที่สอง คือ ชนิด จำนวน และขนาด เป้าหมายสำคัญของปัญหานี้ คือ ทำให้ค่าใช้จ่ายรวมของระบบซึ่งประกอบไปด้วย ค่าใช้จ่ายด้านการลงทุนในส่วนของคาปาซิเตอร์ ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานสูญเสีย และค่าใช้จ่ายด้านกำลังไฟฟ้าสูงสุดสูญเสียให้มีค่าต่ำที่สุด ขณะที่ยังคงรักษาขนาดของแรงดันไฟฟ้าทุกจุดโหลดให้อยู่ภายในขีดจำกัดที่กำหนดสำหรับโหลดหลาย ๆ ระดับ การแก้ปัญหาการติดตั้งคาปาซิเตอร์โดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาค ขณะที่ความสูญเสียของระบบและแรงดันไฟฟ้าที่จุดโหลดสามารถคำนวณได้จากการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแบบย้อนกลับและไปข้างหน้า ประสิทธิภาพของวิธีกลุ่มอนุภาคที่พัฒนาขึ้นแสดงได้ด้วยระบบจำหน่ายที่ต่ออยู่กับบัส 2 ของระบบ (Roy Billinton Test System, RBTS) ประกอบด้วย 4 สายป้อน 22 จุดโหลด และระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค KWA06 ประกอบด้วย 28 สายป้อน 20 จุดโหลด กรณีศึกษาที่น่าสนใจ คือ ในการกำหนดขนาดติดตั้งของคาปาซิเตอร์เป็นแบบ 100 kVar กับ 300 kVar จะให้ผลของตำแหน่งติดตั้งต่างกัน ซึ่งการติดตั้งคาปาซิเตอร์แบบ 100 kVar จะให้ตำแหน่งของการติดตั้งกระจายกว่าการติดตั้งคาปาซิเตอร์แบบ 300 kVar ในขณะที่ให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียลดลงไม่ต่างกันมากนัก ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าวิธีกลุ่มอนุภาคสามารถให้ตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของคาปาซิเตอร์ ที่ทำให้เกิด

ยุทธนา เอี่ยมสมบูรณ์ [7] ได้นำเสนอเกี่ยวกับการหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายที่เหมาะสม เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและเพิ่มความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายโดยวิธีค้นหาแบบตาบู ซึ่งมาจากปัญหาการขาดความเชื่อถือได้ของกำลังไฟฟ้า ประโยชน์การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายในระบบจำหน่าย คือ การลดลงของกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบให้ดีขึ้น หากตำแหน่งในการติดตั้งและขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายได้รับการพิจารณาที่เหมาะสม ปัญหาหลักของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก คือ การหาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมในระบบจำหน่าย เพื่อที่จะลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและค่าความเสียหายของผู้ใช้ไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับ ตำแหน่ง จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย ขนาดกำลังผลิตโดยรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย แรงดันไฟฟ้าที่บัส ความสามารถในการรองรับกระแสของสายป้อน และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายหนึ่งเครื่องสำหรับหนึ่งตำแหน่งติดตั้ง เทคนิคที่ใช้ในการแก้ปัญหาการทำให้ค่าความสูญเสียมีค่าต่ำสุด คือ การค้นหาแบบตาบู การค้นหาแบบนี้เป็นการค้นหาเฉพาะที่ที่ใช้หน่วยความจำเพื่อหลีกเลี่ยงคำตอบข้างเคียงเฉพาะที่ และช่วยให้เคลื่อนที่ออกจากจุดเหมาะสมเฉพาะที่ การแก้ปัญหาดังกล่าวลดค่าความเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับของผู้ใช้ไฟฟ้าให้มีค่าต่ำสุด และใช้วิธีการค้นหาแบบตาบูร่วมกับการวิเคราะห์ค่าความเชื่อถือได้ที่ใช้เป็นตัววัดค่าความเสียหายที่เกี่ยวข้องกับไฟฟ้าดับ วิธีการนี้ได้ทำการทดสอบกับระบบจำหน่ายของระบบทดสอบ RBTS บัส 2 ประกอบด้วย 36 สายป้อน 22 จุดโหลด และระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค KWA01 ประกอบด้วย 9 สายป้อน 6 จุดโหลด และ KWA06 ประกอบด้วย 28 สายป้อน 20 จุดโหลด เป็นของสถานีไฟฟ้าคลองขวาง จังหวัดฉะเชิงเทรา ซึ่งผลทดสอบแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายสามารถนำไปใช้เพิ่มความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่าย ข้อสังเกตในงานวิจัยนี้ คือ ผลกระทบของลำดับการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันที่ทำงานไม่ได้ตามเงื่อนไขเดิม หลังจากมีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายเข้าไป เพราะเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีอุปกรณ์ป้องกันภายในตัว จึงส่งผลกระทบต่อลำดับการทำงานเมื่อต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าร่วมกับอุปกรณ์ป้องกันอื่น ๆ ในระบบ

กนกวรรณ กลิ่นเอี่ยม [8] ได้นำเสนอเกี่ยวกับการหาตำแหน่งการติดตั้งสวิตช์ตัดตอนที่เหมาะสมในระบบจำหน่ายแบบเรเดียลโดยวิธีเชิงพันธุกรรม ซึ่งมาจากปัญหาการขาดความเชื่อถือได้ของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่าย การแก้ปัญหาโดยการติดตั้งสวิตช์ตัดตอนโดยวิธีเชิงพันธุกรรมจะช่วยปรับปรุงความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่าย โดยสวิตช์ตัดตอนเป็นอุปกรณ์ที่จะช่วยแยกส่วนที่เกิดความผิดพร่องออกจากระบบ ดังนั้นในส่วนที่เป็นปกติไม่ได้เกิดความผิดพร่องยังคงสามารถได้รับการจ่ายไฟฟ้า ทำให้สามารถจ่ายไฟฟ้าให้กับทุก ๆ จุดโหลดที่อยู่ระหว่างแหล่งจ่ายและจุดที่ถูกแยกออกก่อนที่ขั้นตอนการซ่อมของอุปกรณ์ที่เกิดความผิดพร่องจะเสร็จสิ้น การหาตำแหน่งที่เหมาะสมของ

H. Mori และ H.Tani [9] ได้นำเสนอเกี่ยวกับการพิจารณาความเหมาะสมของ (Distribution Flexible AC Transmission System, D-FACTS) กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายในระบบจำหน่ายแบบเรเดียลโดยวิธีค้นหาแบบตาบู ซึ่งมาจากปัญหาการขาดเสถียรภาพกำลังไฟฟ้า เช่น มีการติดตั้งตัวชดเชยในระบบจำหน่ายจากพลังงานลม เพราะกลัวว่าเมื่อจ่ายไปสักระยะจะเกิดการไหลกลับจากที่ช่วงปลายโหนดและสถานีย่อย ทำให้มีปัญหาเรื่องความไม่แน่นอนของแรงดันไฟฟ้าขาออกจากการสุ่มที่ทำงานผ่านปลายสายป้อน ประโยชน์การติดตั้ง D-FACTS กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายในระบบจำหน่าย เพื่อลดการเปลี่ยนแปลงที่เสมือนการสุ่มแรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตของระบบจำหน่ายจากพลังงานลม ภายใต้การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่ไม่แน่นอน จะช่วยชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่เป็นสิ่งจำเป็นในการวางแผนในระบบจำหน่าย เนื่องจากเป็นการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ เพิ่มประสิทธิภาพการโอนถ่าย เสถียรภาพชั่วครู่ เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก ปัญหาการติดตั้ง D-FACTS กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย มี 2 ด้าน อย่างแรก คือ ตำแหน่ง และอย่างที่สอง คือ ชนิดจำนวนและขนาด เป้าหมายสำคัญของปัญหานี้ คือ

และควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงสุด เทคนิคที่ใช้มีอยู่ 2 เทคนิค คือ

1. DistFlow เป็น คำนวณกระแสไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสำหรับระบบจำหน่ายแบบ

P. Yan และ A. Sekar [10] ได้นำเสนอเกี่ยวกับการวิเคราะห์ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล ด้วยการอนุกรม (Fast Line Flow Based Algorithm, FLFBA) มาวิเคราะห์ ซึ่งมาจากปัญหาการขาดเสถียรภาพกำลังไฟฟ้า ซึ่งระบบจำหน่ายโดยทั่วไปมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียมากกว่าระบบส่งจ่าย เนื่องจากเป็นระบบที่มีค่าอัตราส่วนระหว่างความต้านทานกับความต้านทานเหนี่ยวนำค่อนข้างสูง ทั้งยังเป็นระบบที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำและมีกระแสไหลในสายมากกว่าระบบส่งจ่าย ประโยชน์การติดตั้ง FACTS คือ ช่วยในการกำหนดรูปของกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟโดยตรง โดยใช้การค้นหาความกว้างครั้งแรก (Breadth First Search, BFS) ที่บัสเมทริกซ์ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียลครั้งแรกจะแสดงบนเส้นทแยงมุมเพื่อพยายามลดการคำนวณลง รูปแบบ ทั่วไปภายใต้เงื่อนไขที่สภาวะคงตัวโดยรวม จะใช้พื้นฐานการไหลในสาย (Line Flow Based, LFB) ในระบบมาตรฐาน IEEE กำหนด เพื่อให้การดำเนินงานได้ง่ายกับการอนุกรมและขนานตัวชดเชย หลาย ๆ ตัวในระบบ ที่ใช้ในบทความนี้ประกอบไปด้วย 1.TCSC ซึ่งถือได้ว่าเป็นตัวเก็บประจุคงที่หรือรีแอคเตอร์ที่เสนอรีแอคแตนซ์ –jwc ด้วยการอนุกรมตัวชดเชยย่อย ในกรณีส่วนใหญ่การขนานกับสาขาย่อยมักจะไม่ได้ถูกนำมาใช้ TCSC จึงเก็บประจุคงที่ได้โดยตรงในการอนุกรมกับความต้านทานสาย 2.

จากงานวิจัยที่ได้ศึกษาผู้ทำวิทยานิพนธ์ได้เล็งเห็นถึงความสำคัญของระบบจำหน่ายแบบเรเดียลว่าระบบจำหน่ายดังกล่าวนั้นมีความสำคัญต่อผู้ใช้ไฟฟ้ามาก เนื่องจากเป็นระบบที่อยู่ใกล้กับ

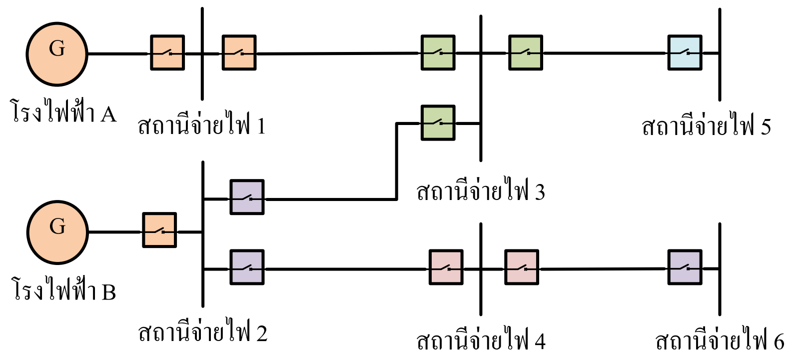
2.2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Distribution Systems)

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าเป็นระบบที่รับพลังงานไฟฟ้าที่ถูกสร้างมาจากระบบผลิตไฟฟ้าผ่านมายังระบบส่งจ่ายไฟฟ้า เพื่อแยกการจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดผู้ใช้ไฟฟ้า มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ สถานีไฟฟ้าทำหน้าที่ปรับลดแรงดันไฟฟ้าก่อนส่งจ่ายไปยังผู้ใช้ไฟฟ้า โดยส่วนใหญ่แล้วระบบจำหน่ายไฟฟ้าจะมีระดับแรงดันไฟฟ้าครอบคลุมทั้งทางด้านปฐมภูมิ ทุติยภูมิ รวมถึงระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุด สำหรับประเทศไทยจะกำหนดแรงดันไฟฟ้าไม่เกิน 115 kV รูปแบบของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 ระบบหลัก คือ ระบบจำหน่ายไฟฟ้าเหนือดิน และระบบจำหน่ายไฟฟ้าใต้ดิน การเลือกใช้ระบบใดนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ค่าใช้จ่ายในการลงทุนความปลอดภัย สิ่งแวดล้อม และความสวยงาม เป็นต้น แต่ที่พบเห็นโดยทั่วไปในประเทศไทยจะเป็นระบบจำหน่ายไฟฟ้าเหนือดิน เนื่องจากมีราคาต่ำกว่าระบบจำหน่ายแบบใต้ดินมาก แต่อย่างไรก็ตามในบริเวณที่มีบ้านเรือนหนาแน่น กรณีต้องเดินสายไฟข้ามแม่น้ำหรือภายในนิคมอุตสาหกรรม นิยมใช้ระบบจำหน่ายไฟฟ้าใต้ดินเพราะสายใต้ดินเป็นสายที่มีฉนวนหุ้ม ยิ่งมีความปลอดภัยและความมั่นคงสูงกว่าระบบจำหน่ายไฟฟ้าเหนือดินในอากาศซึ่งมักจะเป็นสายเปลือย [11]

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ดีนั้นต้องมีการวางแผนการก่อสร้างระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยคำนึงถึงองค์ประกอบต่าง ๆ เช่น ระดับของแรงดันไฟฟ้า ชนิดของวงจรการจ่ายไฟฟ้า ตลอดจนความเหมาะสมในการใช้งานในแต่ละพื้นที่ สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้นำรูปแบบของระบบจำหน่ายไฟฟ้าอยู่ 2 แบบ คือ

2.2.1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล (Radial Distribution Systems)

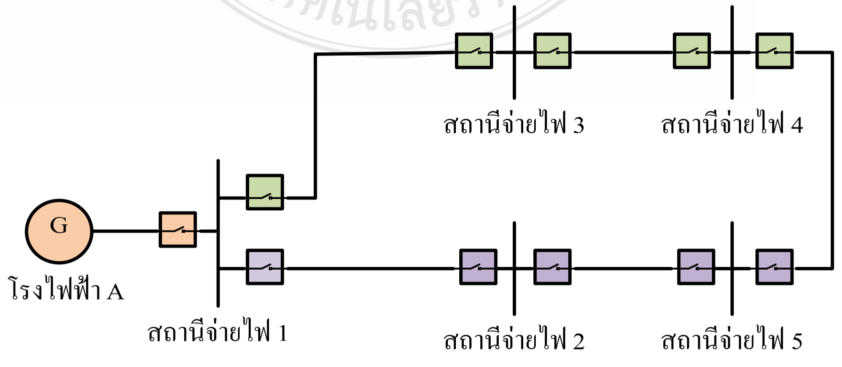
เป็นโครงข่ายระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ง่ายที่สุดที่มีการจ่ายไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าผ่านสายจำหน่ายเพียงด้านเดียว โดยที่พลังงานไฟฟ้าจะไหลไปในทิศทางเดียวกันจากสถานีไฟฟ้าไปยังโหลดภาระการใช้งาน การวางแผนใช้ระบบจำหน่ายนี้หากมีโหลดผู้ใช้ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นในอนาคตก็สามารถที่จะเพิ่มระบบจำหน่ายแบบเรเดียลให้กลายเป็นระบบจำหน่ายแบบลูป หรือระบบจำหน่ายแบบร่างแหต่อไปได้ ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียลนิยมใช้สำหรับจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าในพื้นที่ทั่วไปหรือในชนบท เนื่องจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าประเภทนี้ลงทุนต่ำ มีการป้องกันระบบง่าย ๆ และลักษณะของการวางสายแบบนี้สามารถเข้าใจได้ง่าย แต่มีข้อเสีย คือ ความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ ลักษณะโครงข่ายระบบไฟฟ้าแบบเรเดียล แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงข่ายระบบไฟฟ้าแบบเรเดียล

2.2.2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบลูป (Loop Distribution Systems)

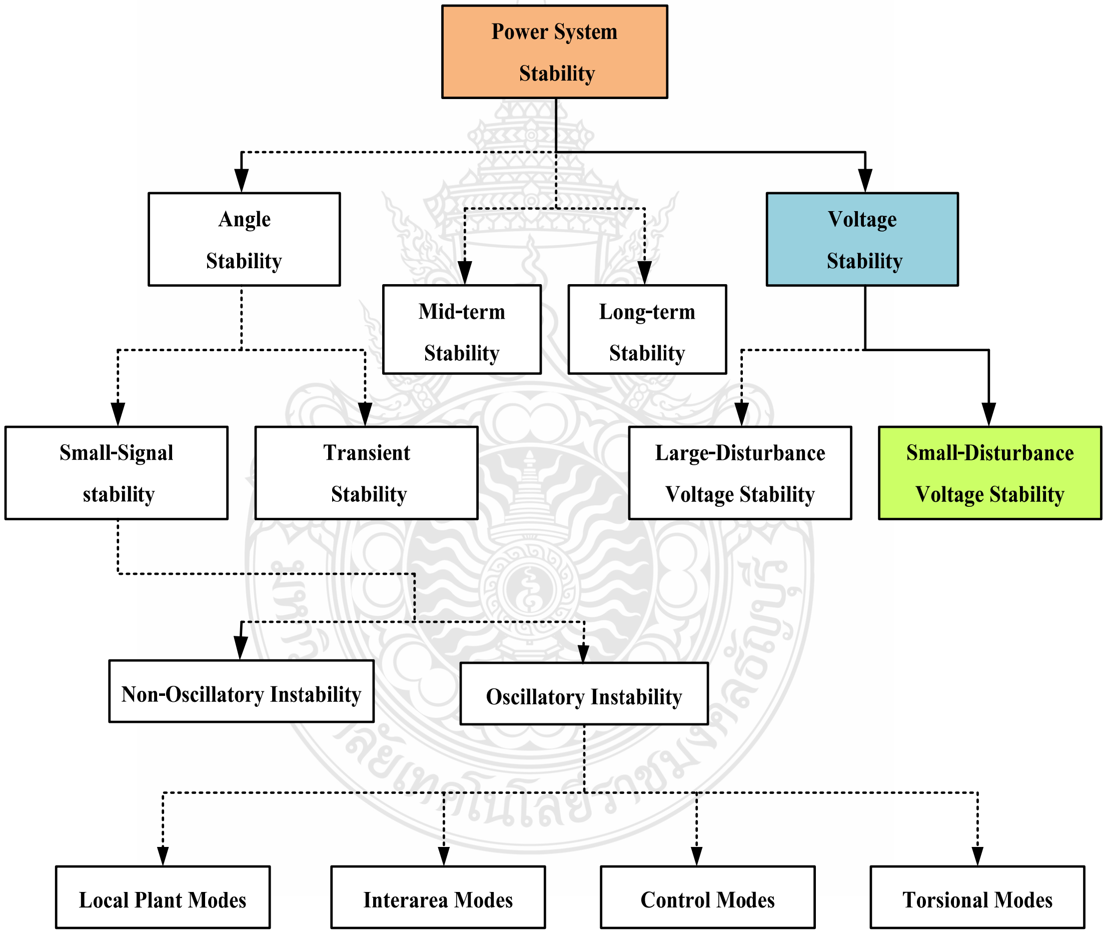
เป็นโครงข่ายระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีการจ่ายไฟฟ้าเข้าที่ต้นทางและปลายทางโดยสถานีจ่ายไฟฟ้าแห่งเดียวกัน ซึ่งผู้ใช้ไฟฟ้าจะสามารถรับพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าหนึ่งทาง ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบนี้ในการใช้งานจริงบางครั้งจะเปิดวงจรออกทำให้ระบบเป็นวงจรจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียลก็ได้ การกระทำเช่นนี้จะทำให้การป้องกันระบบนั้นทำได้ง่ายขึ้น ข้อดีของระบบนี้ คือ เมื่ออุปกรณ์ตัวหนึ่งตัวใดเกิดขัดข้องก็สามารถทำการตัดส่วนนั้นออกไปและวงจรส่วนที่เหลืออยู่ก็สามารถทำการจ่ายไฟฟ้าต่อไปได้อีก ทำให้ระบบมีความเชื่อถือได้สูงขึ้นกว่าระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล ข้อเสียของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบลูป คือ การจ่ายพลังงานไฟฟ้าจะกระทำได้โดยผ่านสถานีจ่ายไฟฟ้าเพียงสถานีเดียว ดังนั้นถ้าเกิดการขัดข้องขึ้นภายในสถานีจ่ายไฟฟ้า ยิ่งจะทำให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง ดังนั้นระบบป้องกันของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบลูป ก็ยังต้องมีขีดความสามารถสูงขึ้นกว่าระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล เนื่องจากระบบป้องกันต้องตรวจสอบให้ทราบว่าเกิดการลัดวงจรขึ้นที่อุปกรณ์ตัวใด เพื่อที่จะได้ตัดอุปกรณ์ส่วนนั้นออกจากการจ่ายพลังงานไฟฟ้าและส่วนที่เหลืออยู่ก็สามารถทำการจ่ายไฟฟ้าไปยังจุดโดหลดที่ไม่ได้รับผลกระทบต่อการเกิดขัดข้องของระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้ ลักษณะโครงข่ายระบบไฟฟ้าแบบลูป แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงข่ายระบบไฟฟ้าแบบลูป

2.3 เสถียรภาพระบบไฟฟ้า (Power System Stability)

เสถียรภาพระบบไฟฟ้า คือ ความสามารถของระบบไฟฟ้าที่ระบบสามารถรักษาสมดุลภายใต้การทำงานปกติ และหากเกิดการรบกวนภายในระบบแล้วยังสามารถนำกลับสู่สภาวะสมดุลที่ยอมรับได้ ซึ่งอาจจะเป็นการรบกวนขนาดเล็ก (Small-Disturbance) หรือการรบกวนขนาดใหญ่ (Large-Disturbance) ก็ได้ โดยหากมีความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น ก็จะส่งผลต่อปัญหาการขาดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบ [12] เสถียรภาพระบบไฟฟ้าสามารถแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะ คือ เสถียรภาพทางมุม (Angle Stability) เสถียรภาพความถี่ (Frequency Stability) และเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า (Voltage Stability) สามารถจำแนกประเภทเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าตามลักษณะที่เกิดขึ้นทางด้านเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังได้ดังรูปที่ 2.3 โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้ [13]



รูปที่ 2.3 การจำแนกเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

1. เสถียรภาพทางมุม คือ ความสามารถของระบบในการรักษาสภาวะสมดุลของเครื่องกลซิงโครนัสที่เชื่อมต่อกับระบบ และยังคงอยู่ได้ในสภาวะซิงโครไนซ์หลังจากเกิดการรบกวนในระบบ

2. เสถียรภาพความถี่ คือ ความสามารถของระบบในการรักษาความถี่ให้คงที่ หลังจากเกิดการขาดความสมดุลของแหล่งจ่ายกับโหลดและจะส่งผลต่อระบบอย่างมาก ซึ่งความสามารถของระบบนี้ขึ้นอยู่กับการรักษาและฟื้นฟูความสมดุลระหว่างแหล่งจ่ายกับโหลด สำหรับความไม่มีเสถียรภาพนี้อาจเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงความถี่ทำให้แหล่งจ่ายหรือโหลดถูกตัดออกจากการทำงาน

3. เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า คือ ความสามารถของระบบในการรักษาระดับของแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ทุกบัสในระบบหลังจากเกิดปัญหาขึ้นภายในระบบ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการเก็บรักษาความสมดุลระหว่างโหลดกับแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าในระบบ ความไม่มีเสถียรภาพนี้อาจเกิดขึ้นจากแรงดันไฟฟ้าที่บัสลดลงหรือเพิ่มสูงขึ้น เนื่องมาจากการสูญเสียที่โหลดหรือในสายส่ง

สภาวะแรงดันไฟฟ้าพังทลาย (Breakdown Voltage) คือ สภาวะที่แรงดันไฟฟ้าของระบบเปลี่ยนแปลงตามความต้องการของโหลด เมื่อโหลดเพิ่มมากขึ้นแรงดันไฟฟ้าของระบบจะค่อย ๆ ลดลงจนถึงจุดวิกฤต ในขณะนี้หากมีการเพิ่มขึ้นของโหลดเพียงเล็กน้อยจะทำให้แรงดันไฟฟ้าของระบบตกลงอย่างมาก เป็นเหตุให้ระบบไม่สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับโหลดได้อีก ซึ่งมีสาเหตุมาจากความสามารถของระบบในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดไม่เพียงพอ สาเหตุของการเกิดพอจะสรุปได้เป็น 2 กรณี คือ การเพิ่มขึ้นของโหลด และไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเข้าสู่ระบบเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าได้เพียงพอ ทั้งนี้เพราะการส่งผ่านกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟส่วนมากสูญเสียไปกับสายส่งระหว่างตำแหน่งของแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ากับตำแหน่งของโหลด ซึ่งในทางปฏิบัติการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเข้าสู่ระบบใช้อุปกรณ์ชดเชยต่าง ๆ เช่น ชุดตัวเก็บประจุ และอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น กับการที่แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าหรือสายส่งชุดใดชุดหนึ่งถูกตัดออกจากระบบทันทีทันใด ทำให้สายส่งหรือแหล่งจ่ายพลังงานอีกชุดหนึ่งต้องจ่ายโหลดเกินพิกัด

2.3.1 เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าสามารถแบ่งเป็นหัวข้อย่อยได้ดังนี้

1. เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าเมื่อเกิดการรบกวนภายในระบบอย่างรุนแรง (Large-Disturbance Voltage Stability) คือ ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความสามารถในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเมื่อเกิดการรบกวนภายในระบบอย่างรุนแรง เช่น การเกิดความผิดพร่องในระบบหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบตัวใดตัวหนึ่งชำรุดเสียหาย

2. เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าเมื่อเกิดการรบกวนภายในระบบเพียงเล็กน้อย (Small-Disturbance Voltage Stability) คือ ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความสามารถในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีการรบกวนหรือมีความผิดปกติภายในระบบเพียงเล็กน้อย เช่น การเปลี่ยนแปลงของโหลดในระบบไฟฟ้า เป็นต้น

กรอบเวลาสำหรับปัญหาด้านเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบส่วนมากจะเริ่มจากวินาทีไปจนถึง10 นาที ดังนั้นเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าจึงแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ระยะเวลาสั้น ๆ (Short-Term) และระยะเวลานาน (Long-Term)

1. เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระยะเวลาสั้น ๆ คือ ส่วนประกอบของโหลดที่มีการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว เช่น มอเตอร์เหนี่ยวนำ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ควบคุมโหลด และอุปกรณ์แปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง คาบเวลาการศึกษาจะมีหน่วยเป็นวินาที

2. เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระยะเวลานาน คือ อุปกรณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ เช่น การควบคุมอุณหภูมิของโหลด และการจำกัดกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า คาบเวลาของการศึกษาจะมีหน่วยเป็นนาที

2.3.2 เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. การทำงานของอุปกรณ์ในระบบ การเกิดแรงดันไฟฟ้าพังทลายมีสาเหตุมาจากอุปกรณ์ป้องกันด้วย ซึ่งการตั้งค่าอุปกรณ์ป้องกันควรจะพิจารณาถึงการเพิ่มขึ้นของโหลดอย่างรวดเร็ว ความสามารถในการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ และมีการตัดตอนส่วนที่มีผลกระทบต่อระบบน้อยที่สุดออกไป

2. กรณีการเกิดความผิดพร่องในระบบ ถ้าใช้เวลาในการตัดความผิดพร่องมากเกินไปจะทำให้แรงดันไฟฟ้าของระบบลดลงจนอาจทำให้เกิดสภาวะการพังทลายได้ ดังนั้นการออกแบบระบบและการตั้งเวลาวิกฤติของระบบ จะต้องคำนึงถึงการเกิดสภาวะแรงดันไฟฟ้าพังทลายเอาไว้ด้วย

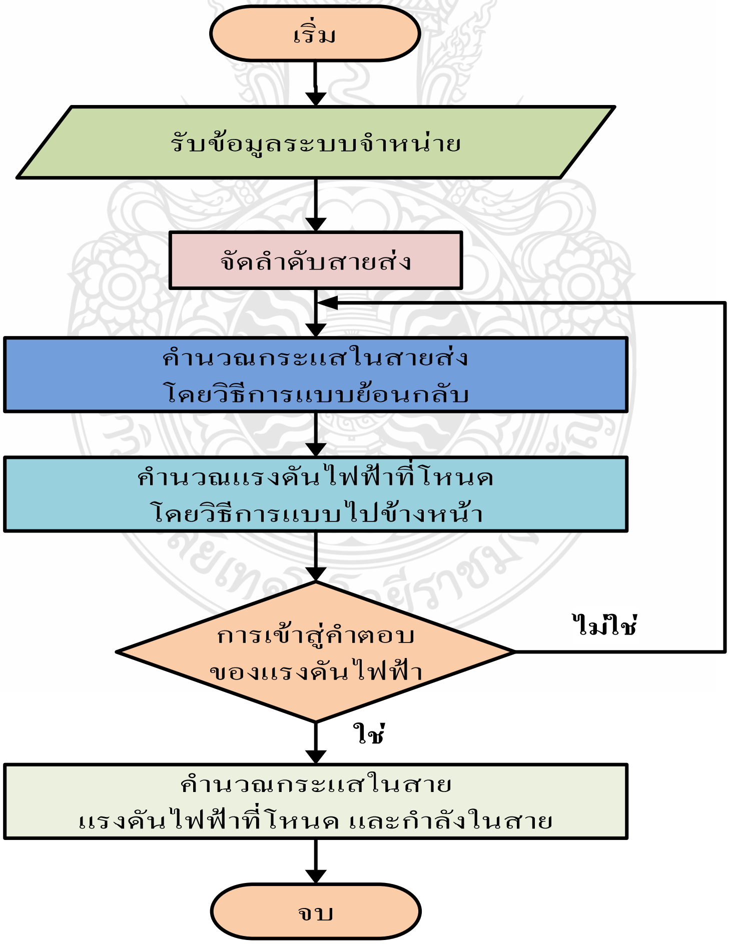
3. ปริมาณและตำแหน่งของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟจากแหล่งกำเนิดจะส่งผ่านมาสู่โหลด เนื่องจากความสูญเสียในสายส่งระหว่างการจ่ายกำลังไฟฟ้า การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟจึงขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ ซึ่งต้องมีปริมาณที่พอเพียงและอยู่ในบริเวณที่ใกล้เคียงกับจุดที่เกิดแรงดันไฟฟ้าพังทลาย

4. ปัจจัยอื่น ๆ เนื่องมาจากปัญหาเศรษฐกิจ สังคม และการเมือง เพราะปกติการเกิดสภาวะแรงดันไฟฟ้าพังทลายมักจะเกิดขึ้นกับระบบที่อยู่ในสภาวะเครียดนั้น คือ ระบบมีความยืดหยุ่นต่ำอันเนื่องมาจากรายจ่ายที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับรายได้ จากสภาวะทางสังคมและเหตุผลทางด้านเศรษฐกิจ ทำให้บรรดาผู้ผลิตไฟฟ้าต่าง ๆ ต้องปิดโรงไฟฟ้าลงอันเนื่องมาจากความไม่คุ้มทุน ส่งผลให้แหล่งจ่ายพลังงานลดลงแต่โหลดมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้ส่งผลต่อเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า

2.4 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (Calculation of Power Flow)

แม้ว่าระบบจำหน่ายไฟฟ้าส่วนใหญ่จะเป็นระบบแบบเรเดียล การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าก็ยังคงมีความสำคัญ เพราะเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าที่จะต้องจ่ายให้ผู้ใช้ไฟฟ้าควรเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึง การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายจะทำให้ทราบระดับแรงดันไฟฟ้าที่โหนดต่าง ๆ ได้ นอกจากนี้คำตอบของการไหลของกำลังในระบบจำหน่าย จะช่วยทำให้การวางแผน

อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าก็ยังมีความสำคัญ เพราะผู้มีหน้าที่จ่ายไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าต้องเตรียมการให้พร้อมเพื่อการจ่ายไฟฟ้าที่มีคุณภาพ และการขยายการให้บริการในอนาคต ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอเทคนิคการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการคำนวณกระแสแบบย้อนกลับและแรงดันไฟฟ้าแบบไปข้างหน้า (Current Backward Sweep and Voltage Forward Sweep) โดยมีลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์ แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลำดับขั้นการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีแบบย้อนกลับและไปข้างหน้า

2.4.1 ข้อมูลในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้านั้น ขั้นต้นจะต้องทราบค่าข้อมูลต่าง ๆ ของระบบจำหน่าย คือ แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า จำนวนโหนด ค่าพารามิเตอร์ของสายตัวนำในแต่ละสาขา และค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดในแต่ละโหนด

1. แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า คือ หม้อแปลงกำลังไฟฟ้าที่สถานีจำหน่ายไฟฟ้า กำหนดให้เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่ เรียกว่า รูตโหนด ใช้เป็นบัสอ้างอิง

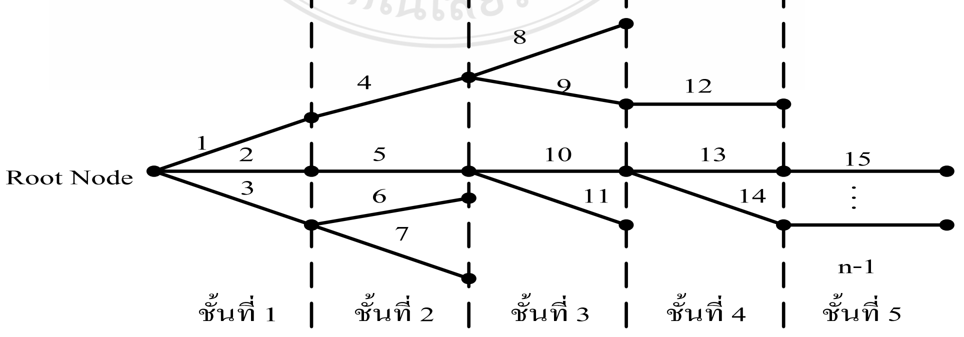
2. โหนด หรือ บัส คือ จุดต่อร่วมของสาขาตั้งแต่สองสาขาขึ้นไป สำหรับระบบจำหน่ายแทนจุดต่อแยกของสายย่อย หรือจุดที่เป็นตำแหน่งหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า

3. สาขา คือ สายตัวนำที่ต่อระหว่างโหนดสองโหนดใด ๆ ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการคือ ค่าความต้านทาน และค่ารีแอคแตนซ์ มีหน่วยเป็นโอห์มต่อหน่วยความยาว ค่าความต้านทานและค่ารีแอคแตนซ์รวมของตัวนำแต่ละสาขาหาได้เมื่อทราบความยาวของสาย

4. โหลด คือ ค่ากำลังไฟฟ้าของโหลด แทนด้วยกำลังไฟฟ้าจริงและค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ ทั้งสองค่าคิดจากเปอร์เซ็นต์การจ่ายโหลดจริงเทียบกับพิกัดกำลังของหม้อแปลงแต่ละตัว อัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ กำหนดให้มีค่าอัตราส่วนคงที่เมื่อกำหนดค่าตัวประกอบกำลัง

2.4.2. การจัดลำดับสายส่ง

ขนาดแรงดันไฟฟ้าและมุมเฟสที่บัสอ้างอิงจะกำหนดให้มีค่าคงที่ ส่วนค่าแรงดันไฟฟ้าและมุมเฟสที่บัสอื่นนั้นเป็นตัวแปรที่ต้องคำนวณหา เมื่อรับข้อมูลระบบจำหน่ายไฟฟ้ามาแล้วต้องจัดลำดับสายส่ง ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีจำนวนโหนด คือ n โหนด จำนวนสาขา คือ b = n-1 สาขา การจัดลำดับสายส่งเริ่มต้นจากรูตโหนดด้านซ้ายมือสุดเรียงกันตามลำดับไปทางด้านขวามือ แบ่งเป็นชั้น ๆ เริ่มต้นจากชั้นที่ 1 ที่ต่ออยู่กับรูตบัส ลำดับสายส่งเริ่มต้นนับจากสาขาที่ 1 เรียงกันไปตามลำดับจากบนลงล่างจนครบทุกสาขา ชั้นถัดไปจะเริ่มต้นเมื่อทุกสาขาในชั้นที่ 1 ได้จัดเรียงสายส่งเรียบร้อยแล้ว ที่ชั้นอื่น ๆ จะต่อเนื่องกันไปตามหลักการเดียวกันนี้จนสิ้นสุดที่สาขาสุดท้าย ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การจัดลำดับสายส่ง

2.4.3 การคำนวณกระแสแบบย้อนกลับ (Current Backward Sweep):KCL

เมื่อจัดลำดับสายส่งเรียบร้อยแล้วก็เข้าสู่การคำนวณกระแสในสาย โดยจะเริ่มจากกระแสที่โหนด จะมีค่าเป็น

$$I_i^{(k)}=(\frac{S_i}{V_i^{(k-1)}})^*-Y_iV_i^{(k-1)} \tag{2.1}$$

เมื่อ S_i คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏที่โหนด $i\left(S_i=P_i\pm jQ_i\right)$

Y_i คือ ผลรวมของแอตมิตแตนซ์ส่วนลงดินทั้งหมดที่โหนด i

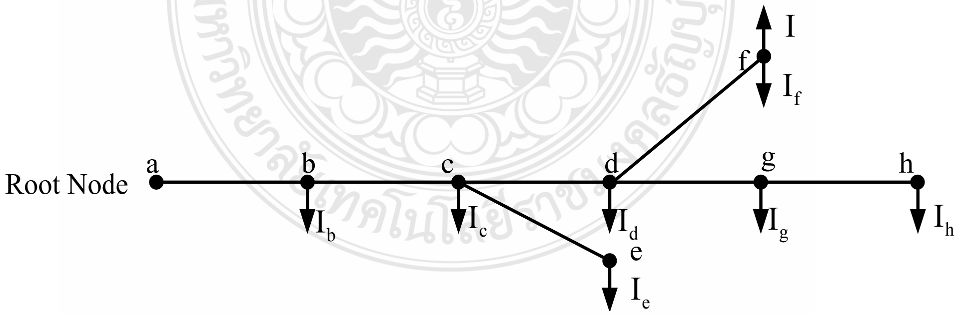
$V_i^{(k-1)}$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่โหนด i ณ รอบคำนวณที่ k-1

k คือ รอบการคำนวณ

การคำนวณกระแสนี้จะเริ่มให้ขนาดแรงดันไฟฟ้าเป็น 1 p.u. และมุมแรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์ที่ทุก ๆ โหนด ส่วนของการคำนวณกระแสในสายจะเริ่มจากการคำนวณที่เรียกว่า การแพร่กระจายถอยหลัง โดยที่รอบคำนวณที่ k จะคำนวณกระแส J ในสายที่สุดท้ายเรื่อยเข้าสู่รูตโหนดหรือรูตบัส โดยกระแสที่สาย L หาได้จากสมการที่ (2.2)

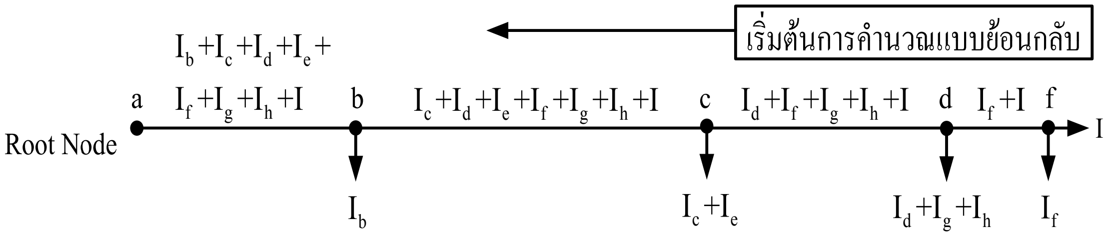
$$J_L^k=-I_{L2}^k+\sum \text{(กระแสในสายที่พุ่งมาจากโหนด } L_2\text{)} \tag{2.2}$$

โดยตัวอย่างกระแสในสายส่งของระบบไฟฟ้าแบบเรเดียล แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กระแสในสายส่งของระบบไฟฟ้าแบบเรเดียล

ซึ่งการหาค่ากระแสในสายดังสมการที่ (2.2) สามารถเขียนได้ดังรูปที่ 2.7 โดยกระแสจะถูกเริ่มหาจากปลายสายดังรูป



รูปที่ 2.7 การคำนวณค่ากระแสในสายส่งในแต่ละช่วงแบบย้อนกลับ

2.4.4 การคำนวณแรงดันไฟฟ้าแบบไปข้างหน้า (Voltage Forward Sweep):KVL

การคำนวณแรงดันไฟฟ้าจะมีลักษณะแบบไปข้างหน้า เริ่มต้นจากบัสอ้างอิง รูตโหนด หรือ รูตบัส โดยค่าแรงดันไฟฟ้ากำหนดให้มีค่าคงที่และมุมเฟสเป็นศูนย์ ส่วนค่าแรงดันไฟฟ้าและมุมเฟสที่บัสอื่น ๆ ถัดไปจากบัสอ้างอิงในรอบคำนวณที่ k จะถูกคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสเรื่อยไปสู่บัสสุดท้าย ดังสมการที่ (2.3)

$$V_{L2}^{(k)}=V_{L1}^{(k)}-Z_L J_L^{(k)} \tag{2.3}$$

เมื่อ Z_L คือ ค่าอิมพีแดนซ์อนุกรมของสายส่งช่วง L ระหว่างโหนด L_2 และ L_1

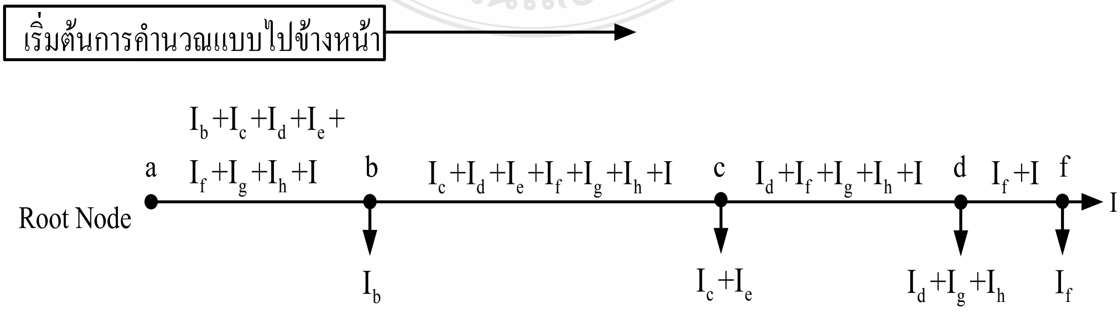
L_2 คือ โหนดปลายทาง

L_1 คือ โหนดต้นทาง

J คือ กระแสในสาย

k คือ รอบการคำนวณ

ซึ่งการหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหนดดังสมการที่ (2.3) สามารถเขียนได้ดังรูปที่ 2.8 โดยแรงดันไฟฟ้าจะถูกเริ่มหาจากต้นสายดังรูป



รูปที่ 2.8 การคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหนดแบบไปข้างหน้า

2.4.5 การเข้าสู่คำตอบของแรงดันไฟฟ้า

การคำนวณค่ากระแสแบบย้อนกลับและการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าแบบไปข้างหน้าจะกระทำในลักษณะเวียนซ้ำ ในแต่ละรอบการคำนวณจะตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าในแต่ละบัส ดังสมการที่ (2.4)

$$\Delta V_j^{(k)} = V_j^{(k)} - V_j^{(k-1)} \tag{2.4}$$

เมื่อ $\Delta V_j^{(k)}$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนแรงดันไฟฟ้าที่พอยอมรับได้ที่บัส j หลังจากการคำนวณในรอบที่ k

$V_j^{(k)}$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส j ในรอบการคำนวณที่ k

$V_j^{(k-1)}$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส j ในรอบการคำนวณที่ k-1

การเข้าสู่คำตอบของแรงดันไฟฟ้าอาจหาได้จากผลต่างของค่าอื่น ๆ ดังสมการที่ (2.5)

$$\begin{Bmatrix} \left|\mathrm{Re}\left(\Delta V_j^{(k)}\right)\right| \le \varepsilon \\ \left|\mathrm{Im}\left(\Delta V_j^{(k)}\right)\right| \le \varepsilon \\ \left|\left(\Delta V_j^{(k)}\right)\right| \le \varepsilon \end{Bmatrix} \tag{2.5}$$

เมื่อ ε คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่พอยอมรับได้

คำตอบแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่าง ๆ จะได้จากการคำนวณในรอบสุดท้าย ซึ่งรอบสุดท้ายจะเกิดขึ้นเมื่อผลต่างแรงดันไฟฟ้าทุกๆ บัส มีค่าต่ำกว่าหรือเท่ากับค่าความคลาดเคลื่อนที่พอยอมรับได้

2.5 ปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าเหมาะสมที่สุด (Problem of Optimal Power Flow)

2.5.1 สมการรูปแบบปัญหา

เป็นการวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้าในสภาวะคงที่ [15] โดยพิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ร่วมกับขอบเขตเงื่อนไขบังคับที่เป็นตัวแปรควบคุม โดยมีรูปแบบทั่วไปดังต่อไปนี้

$$\text{Max / Minimize} \qquad f(x) \tag{2.6}$$

$$\text{Subject to} \qquad g(x)=0 \text{, เงื่อนไขสมการ} \tag{2.7}$$

$$h(x) \le 0 \text{ , เงื่อนไขอสมการ} \tag{2.8}$$

การแปลงเงื่อนไขสมการและอสมการให้เป็นพจน์ปรับโทษ และนำไปรวมกับสมการวัตถุประสงค์เดิมจะได้ฟังก์ชันปรับโทษและเทอมปรับโทษ ดังสมการที่ (2.9) และสมการที่ (2.10)

$$P(x)=f(x)+X(x) \tag{2.9}$$

$$X(x)=\rho\left\{g^2(x)+\left[\max\left(0,h(x)\right)\right]^2\right\} \tag{2.10}$$

โดยที่ $P(x)$ คือ ฟังก์ชันปรับโทษ

$X(x)$ คือ เทอมปรับโทษ

ρ คือ ตัวประกอบการปรับโทษ

การใช้วิธีการปรับโทษทำให้การแก้ปัญหาจากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบมีเงื่อนไขบังคับ เป็นการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบไม่มีเงื่อนไข ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เปลี่ยนเป็นฟังก์ชันปรับโทษนี้แทน ซึ่งง่ายกว่าและมีรูปแบบสมการที่ไม่ซับซ้อน

2.5.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีหลายปัญหาที่นิยมนำมาพิจารณา เช่น การจ่ายโหลดอย่างประหยัด การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ ในวิทยานิพนธ์นี้การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งน้อยที่สุดเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ดังสมการที่ (2.11)

$$\min \quad P_{loss}=\sum_{i=1}^{N_L} g_{i,j}\left\{V_i^2+V_j^2-2V_iV_j\cos\left(\delta_i-\delta_j\right)\right\} \tag{2.11}$$

โดยที่ P_{loss} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่สูญเสียในสายส่งทั้งหมด

N_L คือ จำนวนสายส่งทั้งหมด

V_i คือ ขนาดแรงดันไฟฟ้าบัสที่ i

V_j คือ ขนาดแรงดันไฟฟ้าบัสที่ j

δ_i คือ มุมแรงดันไฟฟ้าบัสที่ i

δ_j คือ มุมแรงดันไฟฟ้าบัสที่ j

$g_{i,j}$ คือ ความนำไฟฟ้าจากบัส i ไปยังบัส j

2.5.3 ระบบเงื่อนไขบังคับ (Constraints)

ตัวแปรปรับตั้งในวิทยานิพนธ์ คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากโรงจักรไฟฟ้า ขนาดแรงดันไฟฟ้าถูกควบคุมโดยสถานีไฟฟ้า แทปหม้อแปลงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ โดยจะการปรับตั้งตัวแปรเหล่านี้เพื่อให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งน้อยที่สุด และยังคงอยู่ในช่วงขีดจำกัดของตัวแปรแต่ละตัว โดยมีตัวแปรที่ต้องการควบคุมตาม คือ พิกัดการไหลกำลังไฟฟ้าของสายส่ง พิกัดช่วงขนาดแรงดันไฟฟ้าทุกบัสในระบบ เพื่อให้ระบบไฟฟ้าทำงานอยู่ในสภาวะปกติ ระบบเงื่อนไขบังคับทั้งเงื่อนไขสมการและอสมการแสดงดังต่อไปนี้

1. เงื่อนไขบังคับสมการเป็นสมการการไหลกำลังไฟฟ้า (Equality Constraints)

$$P_{G,i}-P_{D,i}-\sum_{j=1}^{N_B}|V_i||V_j||Y_{i,j}|\cos\left(\theta_{i,j}-\delta_i+\delta_j\right)=0 \tag{2.12}$$

$$Q_{G,i}-Q_{D,i}+\sum_{j=1}^{N_B}|V_i||V_j||Y_{i,j}|\sin\left(\theta_{i,j}-\delta_i+\delta_j\right)=0 \tag{2.13}$$

โดยที่ $P_{G,i}$ คือ กำลังไฟฟ้าจริงผลิตที่บัส i

$P_{D,i}$ คือ ความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส i

$Q_{G,i}$ คือ กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟผลิตที่บัส i

$Q_{D,i}$ คือ ความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่บัส i

N_B คือ จำนวนบัส

$\theta_{i,j}$ คือ มุมแอตมิตแตนซ์บัส i ไปยังบัส j

$Y_{i,j}$ คือ ขนาดแอตมิตแตนซ์บัส i ไปยังบัส j

2. เงื่อนไขบังคับอสมการเป็นขอบเขตของตัวแปรที่ต้องการปรับตั้ง (Un Equality Constraints)

$$V_i^{min} \le V_i \le V_i^{max} \tag{2.14}$$

$$T_i^{min} \le T_i \le T_i^{max} \tag{2.15}$$

$$P_{G,i}^{min} \le P_{G,i} \le P_{G,i}^{max} \tag{2.16}$$

$$Q_{comp,i}^{min} \le Q_{comp,i} \le Q_{comp,i}^{max} \tag{2.17}$$

โดยที่ V_i^{min} คือ ขอบเขตแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด

V_i^{max} คือ ขอบเขตแรงดันไฟฟ้าสูงสุด

T_i^{min} คือ ขอบเขตแทปหม้อแปลงต่ำสุด

T_i^{max} คือ ขอบเขตแทปหม้อแปลงสูงสุด

$P_{G,i}^{min}$ คือ ขอบเขตของกำลังไฟฟ้าจริงต่ำสุด

$P_{G,i}^{max}$ คือ ขอบเขตของกำลังไฟฟ้าจริงสูงสุด

$Q_{comp,i}^{min}$ คือ ขอบเขตกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟต่ำสุด

$Q_{comp,i}^{max}$ คือ ขอบเขตกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสูงสุด

ดังนั้นฟังก์ชันปรับโทษสามารถเขียนได้ตามสมการที่ (2.18)

$$P(x)=P_{loss}+X_P+X_Q+X_C+X_T+X_V+X_G \tag{2.18}$$

โดยที่
$$X_P=\rho\sum_{i=1}^{N_B}\left\{P_{G,i}-P_{D,i}-\sum_{j=1}^{N_B}|V_i||V_j||Y_{i,j}|\cos\left(\theta_{i,j}-\delta_i+\delta_j\right)\right\}^2 \tag{2.19}$$

$$X_Q=\rho\sum_{i=1}^{N_B}\left\{Q_{G,i}-Q_{D,i}+\sum_{j=1}^{N_B}|V_i||V_j||Y_{i,j}|\sin\left(\theta_{i,j}-\delta_i+\delta_j\right)\right\}^2 \tag{2.20}$$

$$X_C=\rho\sum_{i=1}^{N_C}\left\{\max\left(0,Q_{comp,i}-Q_{comp,i}^{max}\right)\right\}^2+\rho\sum_{i=1}^{N_C}\left\{\max\left(0,Q_{comp,i}^{min}-Q_{comp,i}\right)\right\}^2 \tag{2.21}$$

$$X_T=\rho\sum_{i=1}^{N_T}\left\{\max\left(0,T_i-T_i^{max}\right)\right\}^2+\rho\sum_{i=1}^{N_T}\left\{\max\left(0,T_i^{min}-T_i\right)\right\}^2 \tag{2.22}$$

$$X_V=\rho\sum_{i=1}^{N_B}\left\{\max\left(0,V_i-V_i^{max}\right)\right\}^2+\rho\sum_{i=1}^{N_B}\left\{\max\left(0,V_i^{min}-V_i\right)\right\}^2 \tag{2.23}$$

$$X_G=\rho\sum_{i=1}^{N_G}\left\{\max\left(0,P_{G,i}-P_{G,i}^{max}\right)\right\}^2+\rho\sum_{i=1}^{N_G}\left\{\max\left(0,P_{G,i}^{min}-P_{G,i}\right)\right\}^2 \tag{2.24}$$

โดยที่ N_G คือ จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดในระบบ

N_C คือ จำนวนตัวอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟในระบบ

N_T คือ จำนวนของหม้อแปลงที่ติดตั้งในระบบ

N_B คือ จำนวนบัส

2.6 วิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization Method)

วิธีกลุ่มอนุภาคเกิดขึ้นจากแนวความคิดที่ต้องการศึกษาเลียนแบบการเคลื่อนที่ในการหาอาหารและการอยู่รวมกันเป็นกลุ่มของฝูงนก ฝูงปลา และฝูงแมลง วิธีกลุ่มอนุภาคนี้มีต้นกำเนิดมาจากความคิดของนักวิทยาศาสตร์กลุ่มหนึ่ง ที่สนใจและสังเกตเกี่ยวกับพฤติกรรมการอยู่รวมกันเป็นฝูง หรือ การอยู่รวมกันเป็นกลุ่มของสัตว์ต่างสายพันธุ์มากมายหลายชนิด สิ่งแรกที่นักวิทยาศาสตร์เหล่านี้ได้ศึกษา คือ พฤติกรรมการอยู่รวมกันเป็นสังคมของสัตว์ชนิดนั้น ๆ สำหรับสายพันธุ์ของสัตว์บางชนิด ฝูง หรือ กลุ่ม จะถูกควบคุมด้วยตัวที่เป็นจ่าฝูง ซึ่งอาจมีลักษณะที่แข็งแรงและได้รับการยอมรับจากสมาชิกตัวอื่น ๆ ในฝูง เช่น ฝูงสิงโต ฝูงลิงบาบูน เป็นต้น แต่ก็มีสัตว์บางสายพันธุ์ที่มีพฤติกรรมการอยู่รวมกันเป็นกลุ่มที่น่าสนใจแตกต่างออกไป คือ การอยู่รวมกันเป็นกลุ่มของฝูงนก ฝูงปลา และฝูงแมลง ความน่าสนใจของพฤติกรรมของสัตว์เหล่านี้ คือ การปรับตัวในการอยู่ร่วมกันในกลุ่มโดยไม่ต้องมีผู้นำมาคอยควบคุม สังคมการอยู่รวมกันเป็นกลุ่มของสัตว์เหล่านี้อาศัยการปรับตัวด้วยตัวเองตามสภาพแวดล้อม โดยอาศัยการเรียนรู้คุณลักษณะที่เหมาะสมของการอยู่ร่วมกันภายในกลุ่ม เริ่มต้นจากปฏิสัมพันธ์ของอนุภาคต่ออนุภาคในกลุ่มย่อยจากกลุ่มย่อยรวมไปเป็นกลุ่มใหญ่ [16]

จากพฤติกรรมที่น่าสนใจนี้ ในปี 1995 อัลกอริทึมในการหาค่าเหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาคจึงถูกนำเสนอเป็นครั้งแรกโดย Kennedy และ Eberhart [17] การหาคำตอบจะอาศัยทฤษฎีการเคลื่อนที่ในการหาอาหารและอยู่รวมกันเป็นกลุ่มของฝูงนก ฝูงปลา และฝูงแมลง กระบวนการ หรือ ตัวดำเนินการของวิธีกลุ่มอนุภาคนี้ จะเป็นอัลกอริทึมของการเรียนรู้ในการปรับตำแหน่งของแต่ละอนุภาค จนกระทั่งแต่ละอนุภาคอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมไม่มีการเคลื่อนที่ ปัจจุบันวิธีกลุ่มอนุภาคนี้ได้นำไปประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดในหลาย ๆ แขนงวิชารวมถึงปัญหาระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น ปัญหาการเลือกจ่ายพลังงานไฟฟ้าโดยคำนึงถึงหลักเศรษฐศาสตร์ ปัญหาการควบคุมให้เหมาะสม ปัญหาการวางแผนระบบไฟฟ้ากำลัง และปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมอื่น ๆ เนื้อหาในส่วนนี้จะกล่าวถึง วิวัฒนาการของวิธีปัญญาประดิษฐ์ หลักการพื้นฐานของวิธีกลุ่มอนุภาค อัลกอริทึมในการปรับตำแหน่งของวิธีกลุ่มอนุภาค การกำหนดค่าตัวแปรของวิธีกลุ่มอนุภาค แบบจำลองของวิธีกลุ่มอนุภาคในการหาคำตอบที่ดีที่สุด

2.6.1 วิวัฒนาการของวิธีปัญญาประดิษฐ์

วิธีกลุ่มอนุภาคเป็นหนึ่งในวิธีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) เป็นวิธีการหาคำตอบที่ใช้การสุ่มค่าเริ่มต้น และมีการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของคำตอบ โดยใช้อัลกอริทึมที่คิดค้นขึ้นโดย Kennedy และ Eberhart ในปี 1995 ซึ่งวิธีปัญญาประดิษฐ์นี้ได้มีการนำเสนอขึ้นมาใช้งานหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีหลักการและอัลกอริทึมต่างกัน โดยมีวิวัฒนาการมายาวนานตั้งแต่ปี 1953 ดังรูปที่ 2.9

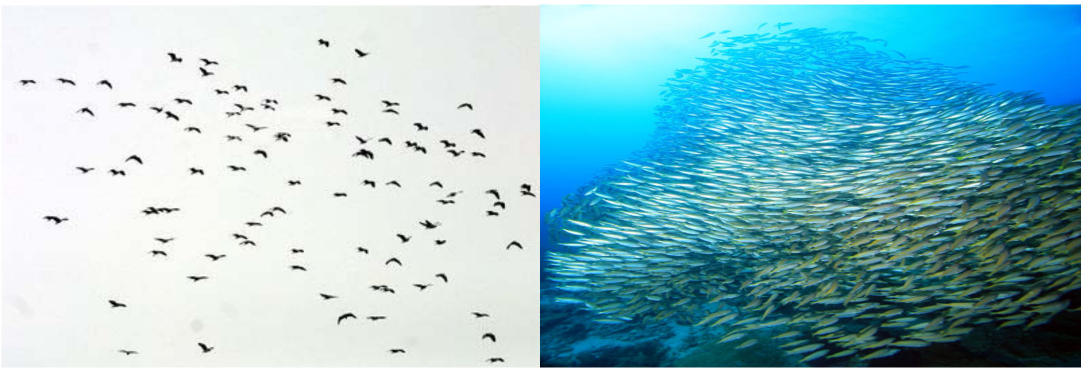
Simulated Annealing 1953	Expert System 1969	Genetic Algorithm 1975	Tabu Search 1989	Ant System 1991	Particle Swarm Optimization 1995

รูปที่ 2.9 วิวัฒนาการของวิธีปัญญาประดิษฐ์

จากรูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นถึงวิวัฒนาการของวิธีปัญญาประดิษฐ์ที่เป็นมายาวนาน โดยในปี 1953 ได้มีการนำเสนอวิธีการอบเหนียว ซึ่งใช้หลักของการให้ความร้อนหลอมเหล็กที่อุณหภูมิสูงและลดอุณหภูมิลงอย่างช้า ๆ เพื่อให้ได้เหล็กที่มีคุณภาพที่ดี ต่อมาในปี 1969 ได้มีการนำเสนอวิธีระบบผู้เชี่ยวชาญ วิธีนี้ใช้หลักการในการอาศัยประสบการณ์และข้อมูลการเรียนรู้ที่ได้เก็บรวบรวมไว้นำมาใช้เปรียบเทียบกับคำตอบของข้อมูลปัจจุบัน ปี 1975 วิธีเชิงพันธุกรรม ถูกนำเสนอครั้งแรกต่อสาธารณชนโดยการหาคำตอบของวิธีนี้จะอาศัยทฤษฎีการวิวัฒนาการสิ่งมีชีวิต ที่กล่าวว่าผู้ที่แข็งแกร่งกว่าย่อมมีโอกาสที่จะอยู่รอด และถ่ายทอดคุณลักษณะเด่นที่มีไปยังรุ่นถัดไปในขณะที่ผู้อ่อนแอกว่าย่อมตายไป ปี 1989 ได้มีการนำเสนอวิธีการค้นหาแบบตาบู ซึ่งใช้หลักการการค้นหาคำตอบไปทั่วพื้นที่ของการค้นหา โดยจะเก็บค่าตัวแปรที่ให้คำตอบที่ดีที่สุดไว้ในตารางตาบู ปี 1991 วิธีการที่ใช้ธรรมชาติในการเลือกเส้นทางเดินหาอาหารของมด ได้ถูกนำเสนอขึ้นโดยใช้หลักการที่ว่ามดจะจดจำเส้นทางการเดินที่สั้นที่สุดในการเดินไปยังจุดหมาย และปล่อยฟีโรโมนเพื่อให้มดตัวอื่นรู้และปรับเส้นทางการเดินให้เหมาะสม และในปี 1995 ได้มีการนำเสนออัลกอริทึมของวิธีกลุ่มอนุภาคซึ่งใช้หลักการอยู่รวมกันเป็นกลุ่มของนก ปลา และแมลง

2.6.2 หลักการพื้นฐานของวิธีกลุ่มอนุภาค

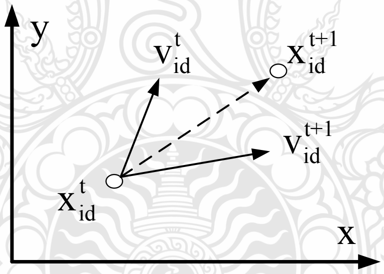
จากที่กล่าวมาข้างต้นหลักการพื้นฐานของวิธีกลุ่มอนุภาคนั้น คือ การอาศัยการเรียนรู้ของการเคลื่อนที่ในการหาอาหารและอยู่รวมกันเป็นกลุ่มของฝูงนก ฝูงปลา และฝูงแมลง ซึ่งต่อไปจะเรียกว่า กลุ่มอนุภาค (Swarm) อนุภาคเหล่านี้จะเรียนรู้และเคลื่อนที่ปรับเปลี่ยนตำแหน่งของตัวเองไปตามอนุภาคแวดล้อมที่อยู่ในตำแหน่งที่ดีและเหมาะสมกว่า เมื่อปรับเปลี่ยนตำแหน่งจนทุกอนุภาคอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมและมีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันแล้วก็จะหยุดการปรับเปลี่ยนทิศทาง ดังจะเห็นได้จากตัวอย่างการบินของฝูงนก และการว่ายน้ำของฝูงปลา แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การอยู่รวมกันเป็นฝูงของนกและปลา

2.6.3 อัลกอริทึมในการปรับตำแหน่งของวิธีกลุ่มอนุภาค

อัลกอริทึมของวิธีกลุ่มอนุภาคเป็นอัลกอริทึมที่ปรับตัวเองบนพื้นฐานของการเรียนรู้สถานการณ์และใช้ข้อมูลร่วมกัน อนุภาคที่อยู่ภายในกลุ่มจะปรับเปลี่ยนตำแหน่งโดยการอาศัยการเรียนรู้จากอนุภาคข้างเคียงที่อยู่ในตำแหน่งที่ให้ค่าที่ดีกว่า การปรับเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาค แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาค

อัลกอริทึมที่สำคัญในการปรับตำแหน่งแสดงได้ตามสมการที่ (2.25) และสมการที่ (2.26) โดยสมการที่ (2.25) แสดงถึงความเร็วในการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาค และสมการที่ (2.26) แสดงถึงตำแหน่งใหม่ของอนุภาคหลังปรับเปลี่ยนตำแหน่งแล้ว

$$V_{id}^{t+1}=W^{*}V_{id}^{t}+Rand_{1}()^{*}C_{1}^{*}(Pbest_{id}-X_{id}^{t})+Rand_{2}()^{*}C_{2}^{*}(Gbest_{d}-X_{id}^{t}) \quad (2.25)$$

$$X_{id}^{t+1}=X_{id}^{t}+V_{id}^{t+1} \quad (2.26)$$

โดยที่ X_{id}^{t} คือ ตำแหน่งของอนุภาค i ของตัวแปร d ในรอบการคำนวณที่ t

X_{id}^{t+1} คือ ตำแหน่งของอนุภาค i ของตัวแปร d ในรอบการคำนวณที่ t+1

V_{id}^{t} คือ ความเร็วในการเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาค i ของตัวแปร d ในรอบการคำนวณที่ t

V_{id}^{t+1} คือ ความเร็วในการเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาค i ของตัวแปร d ในรอบการคำนวณที่ t+1

$Rand_1(), Rand_2()$ คือ ตัวเลขสุ่มระหว่าง 0 ถึง 1

$Pbest_{id}$ คือ ตำแหน่งที่ดีที่สุดของอนุภาค i ของตัวแปร d

$Gbest_d$ คือ ตำแหน่งที่ดีที่สุดในทุก ๆ อนุภาคของตัวแปร d

W คือ ค่าถ่วงน้ำหนัก

C_1, C_2 คือ ค่าคงที่ความเร่ง

จากสมการที่ (2.25) และสมการที่ (2.26) สามารถอธิบายการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาคได้ดังนี้ สมการที่ (2.25) นั้นเป็นสมการที่แสดงการปรับความเร็วในการเปลี่ยนตำแหน่งของแต่ละอนุภาคโดยประกอบไปด้วย 3 ส่วน ส่วนแรกเป็นส่วนที่ประกอบไปด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก (W) คูณอยู่กับความเร็วของอนุภาคเดิม (V_{id}^{t}) เป็นการทำให้คำตอบเกิดความหลากหลายไม่ติดอยู่กับคำตอบเฉพาะที่เดิม ๆ ส่วนที่สองเป็นส่วนที่แต่ละอนุภาคจะปรับค่าความเหมาะสมของตัวเองในปัจจุบันกับค่าของอนุภาคที่ดีที่สุดเฉพาะที่เท่าที่มีอยู่ในขณะนั้น แทนอนุภาคที่ดีที่สุดเฉพาะที่ด้วยตัวแปร $Pbest_{id}$ ส่วนสุดท้ายเป็นส่วนที่แต่ละอนุภาคจะปรับค่าเหมาะสมของตัวเองในปัจจุบันกับค่าของอนุภาคที่ดีที่สุดของกลุ่มอนุภาคในรุ่นนั้น แทนอนุภาคที่ดีที่สุดในกลุ่มว่า $Gbest_d$

2.6.4 การกำหนดค่าตัวแปรของวิธีกลุ่มอนุภาค

การกำหนดค่าตัวแปรในวิธีกลุ่มอนุภาคมีความสำคัญในการลู่เข้าของคำตอบดังนั้นจึงต้องกำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ ให้มีความเหมาะสมกับปัญหาดังจะกล่าวต่อไปนี้

1. ค่าคงที่ความเร่ง (C_1, C_2) ค่าคงที่ความเร่ง C_1 และ C_2 มีผลต่อความเร็วในการลู่เข้าสู่คำตอบโดย C_1 มีผลต่อการลู่เข้าสู่คำตอบที่ดีของตำแหน่งในปัจจุบันและ C_2 มีผลต่อการลู่เข้าสู่คำตอบที่ดีที่สุดของตำแหน่งในปัจจุบัน การกำหนดค่าคงที่ทั้งสองนี้มีความสำคัญโดยปกติจะกำหนดให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 4 ซึ่งต่อไปจะเป็นการอธิบายถึงผลของการกำหนดค่าคงที่ C_1 และ C_2

ก. กำหนดให้ค่าคงที่ C_1 และ C_2 มีค่าต่ำทั้งคู่ การกำหนดให้ค่าคงที่ C_1 และ C_2 มีค่าสูงทั้งคู่นั้นจะส่งผลให้การค้นหาคำตอบห่างไกลจากเป้าหมาย เนื่องจากอนุภาคมีอัตราเร่งในการเคลื่อนที่ต่ำจึงวนอยู่กับคำตอบเฉพาะที่ไม่สามารถข้ามผ่านไปสู่จุดที่ให้คำตอบที่ดีกว่าได้

ข. กำหนดให้ค่าคงที่ C_1 และ C_2 มีค่าสูงทั้งคู่ การกำหนดให้ค่าคงที่ C_1 และ C_2 มีค่าสูงทั้งคู่นั้นจะส่งผลให้การค้นหาคำตอบเกิดการเคลื่อนที่ผ่านเป้าหมายไป เนื่องจากอนุภาคมีอัตราเร่งในการเคลื่อนที่สูง เพราะฉะนั้นการที่อนุภาคมีอัตราเร่งในการเคลื่อนที่สูงอาจทำให้ไม่เจอคำตอบ

ค. กำหนดให้ค่าคงที่ C_1 มีค่าต่ำ และ C_2 มีค่าสูง การกำหนดค่าคงที่แบบนี้จะทำให้การค้นหาคำตอบลู่เข้าสู่คำตอบอย่างรวดเร็ว แต่คำตอบที่ได้ส่วนใหญ่จะเป็นคำตอบเฉพาะที่

ง. กำหนดให้ค่าคงที่ C_1 มีค่าสูง และ C_2 มีค่าต่ำ การกำหนดค่าคงที่แบบนี้จะทำให้เกิดการค้นหาคำตอบในแต่ละพื้นที่เป็นแบบกระจัดกระจายไม่เป็นรูปแบบที่สอดคล้องกัน ทำให้ไม่สามารถลู่เข้าสู่คำตอบที่ดีได้

จะเห็นได้ว่าการกำหนดค่าคงที่ C_1 และ C_2 นั้นมีผลในการลู่เข้าสู่คำตอบ ดังนั้นจึงต้องกำหนดค่าให้เหมาะสม ที่นิยมใช้กัน คือ ค่าคงที่ C_1 และ C_2 มีค่าเท่ากับ 2 ในส่วนของการกำหนดจำนวนอนุภาคในการคำนวณนั้น จะมีค่าอยู่ระหว่าง 10 ถึง 100 แล้วแต่ความเหมาะสมของปัญหา จำนวนรอบสูงสุดที่ใช้โดยทั่วไปประมาณ 500 รอบ

2. ค่าถ่วงน้ำหนัก (W) ค่าถ่วงน้ำหนักนี้จะทำให้คำตอบมีความหลากหลายไม่ตกอยู่กับคำตอบเฉพาะที่ ค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมจะทำให้การค้นหาคำตอบมีความสมดุลระหว่างการหาคำตอบเฉพาะที่และการค้นหาคำตอบจากขอบเขตทั้งหมด ซึ่งจะทำให้รอบในการค้นหาคำตอบน้อยลงโดยทั่วไปขอบเขตของค่าถ่วงน้ำหนักนี้จะถูกกำหนดอยู่ระหว่าง 0.4 กับ 0.9 โดยสมการในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักนี้ แสดงได้ตามสมการที่ (2.27)

$$W=W_{max}-\frac{W_{max}-W_{min}}{k}t \tag{2.27}$$

โดยที่ W_{min} คือ ขอบเขตล่างของค่าถ่วงน้ำหนัก

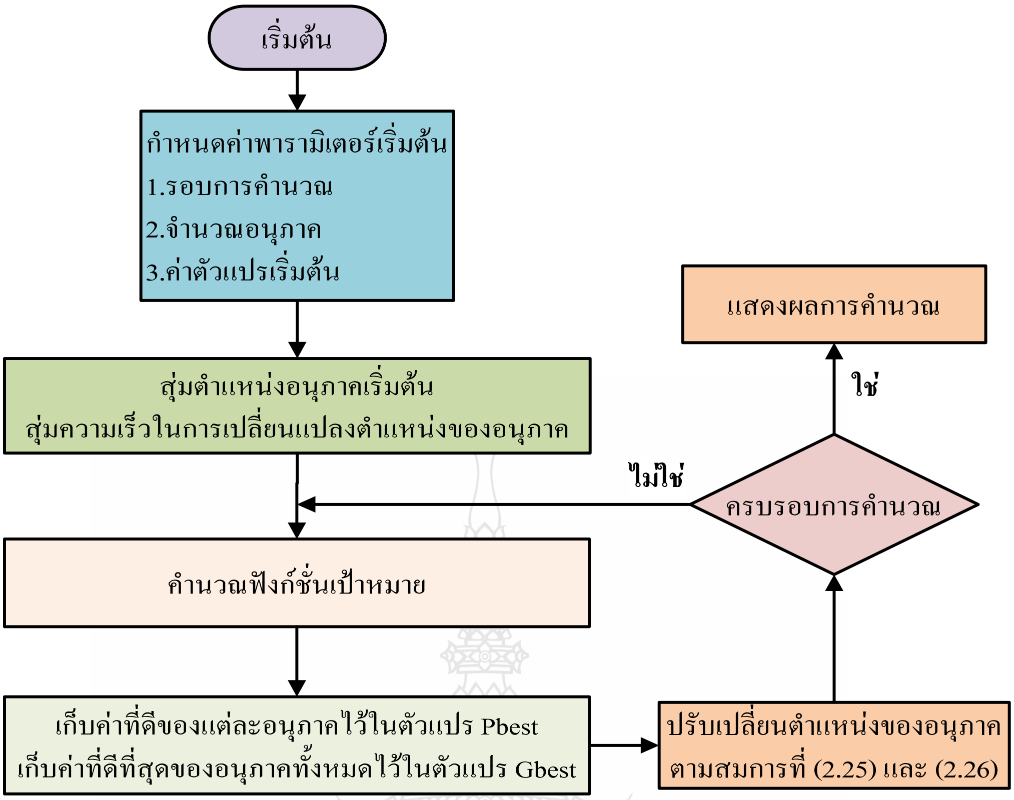
W_{max} คือ ขอบเขตบนของค่าถ่วงน้ำหนัก

t คือ รอบการคำนวณปัจจุบัน

k คือ รอบการคำนวณทั้งหมด

2.6.5 แบบจำลองของวิธีกลุ่มอนุภาคในการหาคำตอบที่ดีที่สุด

จากหลักการและอัลกอริทึมของวิธีกลุ่มอนุภาคที่กล่าวมาข้างต้นนั้น สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ โดยเริ่มจากสร้างฟังก์ชันเป้าหมายและใช้การปรับเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาคในสมการข้างต้นเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด สามารถแสดงขั้นตอนการคำนวณได้ แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ขั้นตอนการคำนวณหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาค

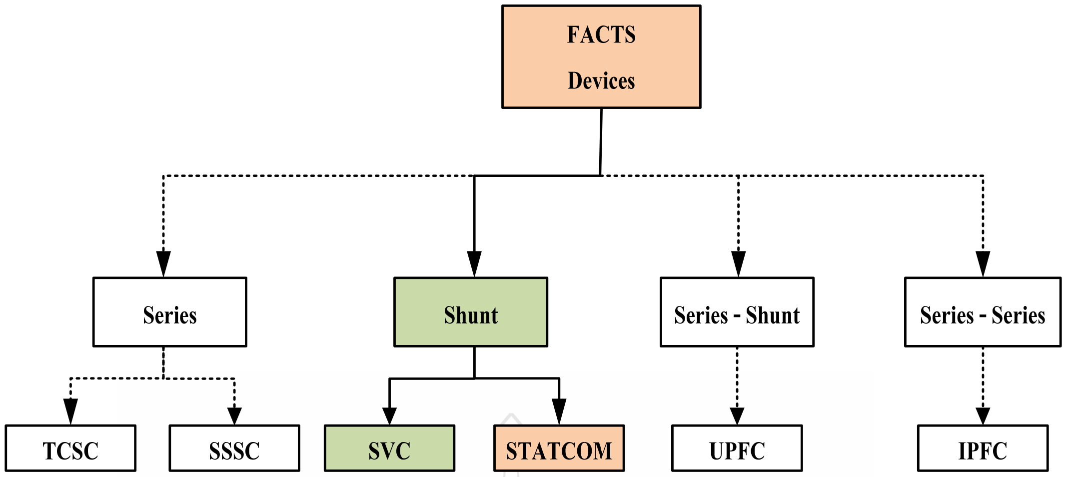
2.7 อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น (FACTS Device)

การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเพื่อรักษาแรงดันไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง เป็นที่รู้จักกันเป็นอย่างดีในยุคปัจจุบันที่อิเล็กทรอนิกส์มีความก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็ว อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น FACTS ทำให้การควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เรียบและยืดหยุ่น และยังสามารถตอบสนองได้รวดเร็วกว่าอุปกรณ์การควบคุมแบบดั้งเดิมมาก FACTS มีอยู่ด้วยกันหลายชนิด เช่น

FACTS

หากกล่าวถึง D-FACTS แล้วก็จะหมายความเฉพาะถึงอุปกรณ์ที่จะใช้ชดเชยปัญหาคุณภาพ

อุปกรณ์ FACTS มีหลายประเภท ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนออุปกรณ์ FACTS 2 ชนิด คือ แบบต่อขนาน SVC และ STATCOM ด้วยการทำงานที่รวดเร็วและเรียบของอุปกรณ์ FACTS การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบสามารถจัดสรรได้ใหม่ ทำให้ขีดความสามารถของระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้ถูกใช้ประโยชน์อย่างเต็มที่



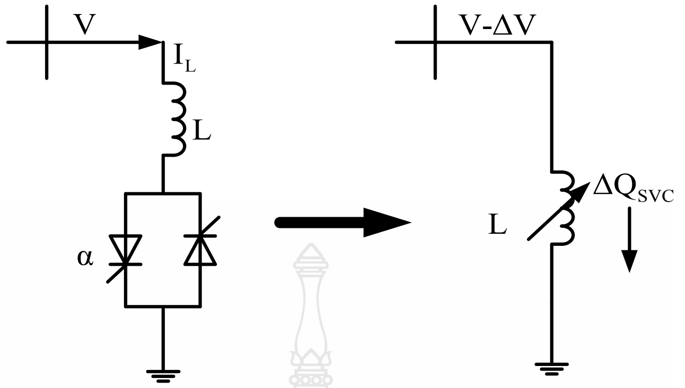
รูปที่ 2.13 อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น

2.7.1 Static Var Compensator (SVC)

ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบสถิตติดตั้งขนานกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า [18] จะมีลักษณะเป็นแหล่งจ่ายและโหลดทางไฟฟ้า เพราะสามารถจ่ายและรับค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟจากระบบได้ และจะช่วยในการรักษาระดับของแรงดันไฟฟ้าในระบบเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่บัสลดลงหรือเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจะเป็นการช่วยเพิ่มเสถียรภาพของระบบจำหน่ายไฟฟ้า สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ TCR และ TSC ซึ่งลักษณะการติดตั้งของ SVC แสดงดังรูปที่ 2.14

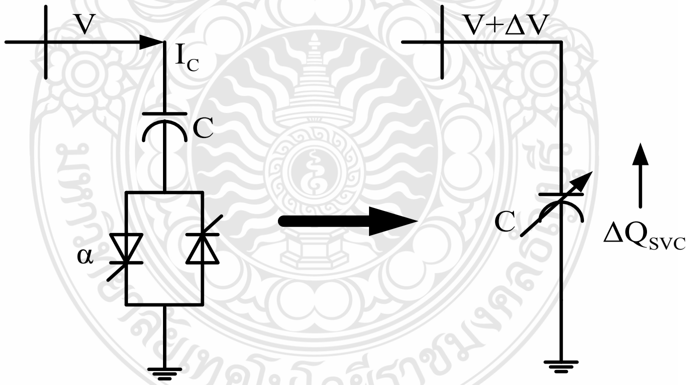
รูปที่ 2.14 ลักษณะการติดตั้งของ SVC [19]

1. ไทริสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ (Thyristor Controlled Reactor, TCR) และตัวเหนี่ยวนำ จะใช้ไทริสเตอร์ควบคุมรีแอคเตอร์ โดยมีรูปแบบการต่อแสดงดังรูปที่ 2.15

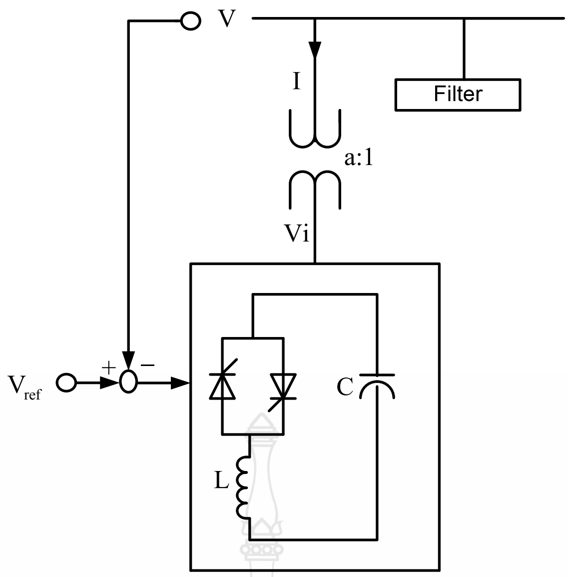


รูปที่ 2.15 Thyristor Controlled Reactor, TCR

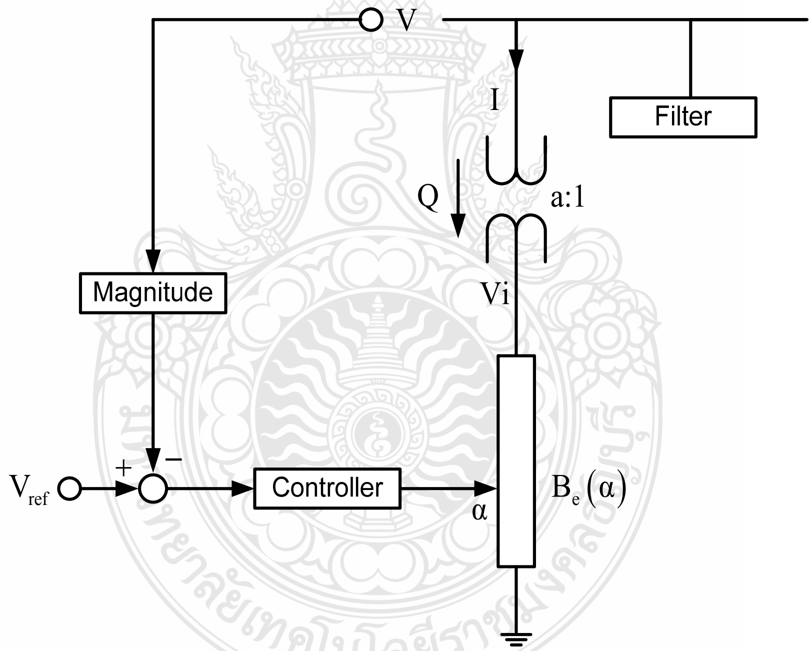
2. ไทริสเตอร์สวิตช์คาปาซิเตอร์ (Thyristor Switched Capacitor, TSC) และตัวเก็บประจุคงที่ (FC Fixed Capacitor) หรือเรียกย่อว่า TSC / FC ตัวเก็บประจุคงที่ จะใช้การสวิตช์ทางกล โดยมีรูปแบบการต่อแสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 Thyristor Switched Capacitor, TSC



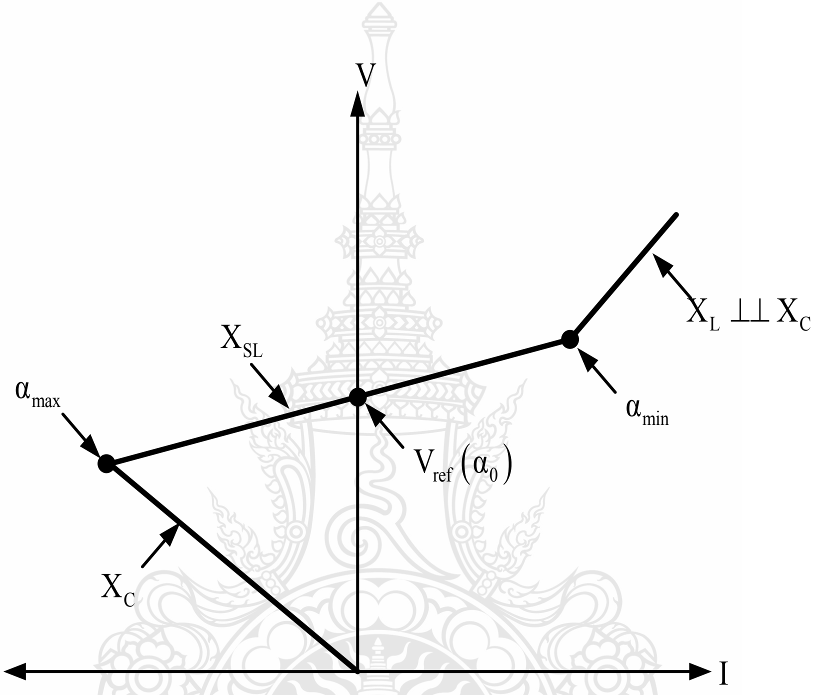
รูปที่ 2.17 ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของ SVC



รูปที่ 2.18 แบบจำลองของ SVC

ความสำคัญของ SVC ในระบบไฟฟ้ากำลัง คือ รักษาแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในระดับคงที่ หรือ ใกล้เคียง ภายใต้ภาวะการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ ของโหลด แก้ไขการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากเหตุการณ์ที่ไม่พึงประสงค์ เช่น การปลดโหลด การล้มเหลวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบางตัวในระบบไฟฟ้า ลดการกระพริบของแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงของโหลด เช่น โหลดเตาหลอมแบบอาร์ก ปรับปรุงเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง คือ ปรับปรุงเสถียรภาพ

SVC สามารถควบคุมตัวเหนี่ยวนำที่ต่อขนานและตัวเก็บประจุที่ต่อขนานได้ดังรูปที่ 2.17 โดย SVC จะสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่บัสในระบบไฟฟ้ากำลังได้ และจากรูปที่ 2.18 SVC จะใช้การควบคุมมุมจุดชนวนของไทริสเตอร์ รับ หรือ จ่าย ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ มุมจุดชนวนจะอยู่ในช่วงระหว่าง 90°-180° คุณลักษณะเฉพาะแรงดันและกระแสไฟฟ้าของ SVC แสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 คุณลักษณะเฉพาะแรงดันและกระแสไฟฟ้าของ SVC

จากรูปที่ 2.19 การทำงานของ SVC ขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าที่บัส ส่วนขอบเขตของค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของ SVC จะขึ้นอยู่กับขนาดของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ที่จุด α_{min} คือ ตำแหน่งที่สวิตช์ไทริสเตอร์ควบคุมตัวเหนี่ยวนำทำงานรับค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟจากระบบตามพิกัดของตัวเหนี่ยวนำ และที่จุด α_{max} คือ ตำแหน่งที่สวิตช์ไทริสเตอร์ควบคุมตัวเก็บประจุทำงานจ่ายค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟตามขนาดพิกัดของตัวเก็บประจุ

ส่วนประกอบในการควบคุมของ SVC มีความสำคัญมากในแบบจำลองของ SVC ซึ่งสมการเชิงอนุพันธ์ของแบบจำลองของ SVC สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเปอร์ยูนิตได้ ดังสมการที่ (2.28) และสมการที่ (2.29)

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_c \\ \dot{\alpha}\end{bmatrix}=f\left(x_c,\alpha,V,V_{ref}\right) \tag{2.28}$$

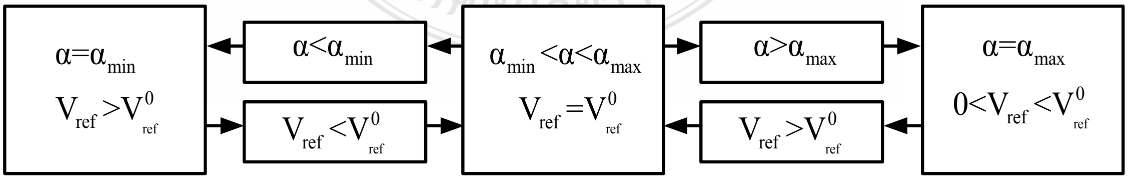
$$0=\underbrace{\begin{bmatrix} B_e-\dfrac{2\alpha-\sin2\alpha-\pi(2-X_L/X_C)}{\pi X_L} \\ I-V_iB_e \\ Q-V_i^2B_e \end{bmatrix}}_{g(a,V,V_i,I,Q,B_e)} \tag{2.29}$$

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทุกค่าจะต้องกำหนดค่าให้ชัดเจนในรูปที่ 2.18 โดยที่ X_c และ f(.) ยังคงอยู่สำหรับปรับการควบคุมระบบและสมการตามลำดับ ซึ่งจะไม่มีการกำหนดขอบเขตของสมการยกเว้นมุมการจุดชนวน (α) โดยเฉพาะกระแส (I) การควบคุมแรงดันไฟฟ้า (V) และแรงดันไฟฟ้า SVC (Vi) เช่นเดียวกันกับค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ

จากสมการที่ (2.28) และสมการที่ (2.29) แบบจำลองของ SVC ในสภาวะคงตัวสามารถเขียนแทนได้ ดังสมการที่ (2.30)

$$0=\begin{bmatrix} V-V_{ref}-X_{SL}I \\ g(\alpha,V,V_i,I,Q,B_e) \end{bmatrix} \tag{2.30}$$

ขอบเขตการควบคุมของ SVC คือ การควบคุมค่าของมุมจุดชนวนไทริสเตอร์ ซึ่งอยู่ในช่วง $\alpha_m<\alpha<\alpha_M$ เมื่อ α_m และ α_M คือ มุมจุดชนวนน้อยที่สุดและมุมจุดชนวนมากที่สุดตามลำดับ ถ้าไม่รู้วิธีหาขอบเขตมุมจุดชนวน ให้กำหนดมุมจุดชนวนให้คงที่และเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง V_{ref} วิธีการของการจัดการควบคุมขอบเขต แสดงดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 การจำกัดขอบเขตการควบคุมในแบบจำลองสภาวะคงตัวของของ SVC

2.7.2 Static Synchronous Compensator (STATCOM)

โดยทั่วไปแล้วคำว่า STATCOM มักนิยมใช้อธิบายถึงอุปกรณ์ที่เป็นการชดเชย

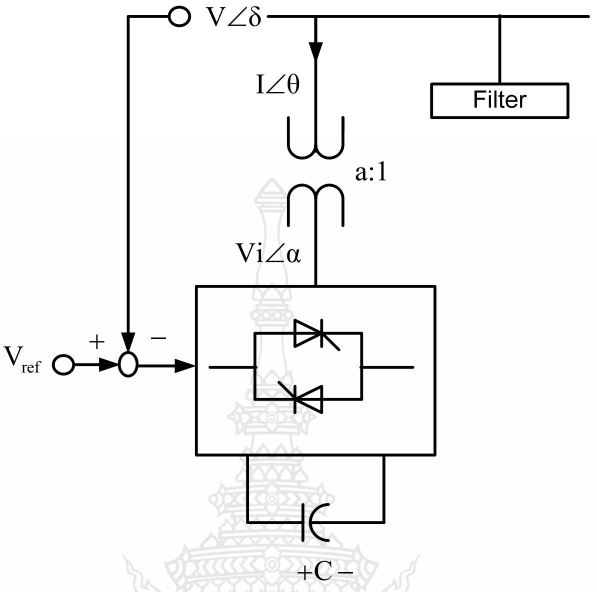
STATCOM มีลักษณะคล้ายกันกับซิงโครนัสคอนเดนเซอร์ แต่เป็นการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง และมีหม้อแปลงเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากับบัส STATCOM สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่บัสโดยการควบคุมการ จ่าย หรือ รับ กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟจากระบบไฟฟ้ากำลัง Distribution Static Synchronous Compensator

[20] ซึ่งลักษณะการติดตั้งของ STATCOM แสดงดังรูปที่ 2.21

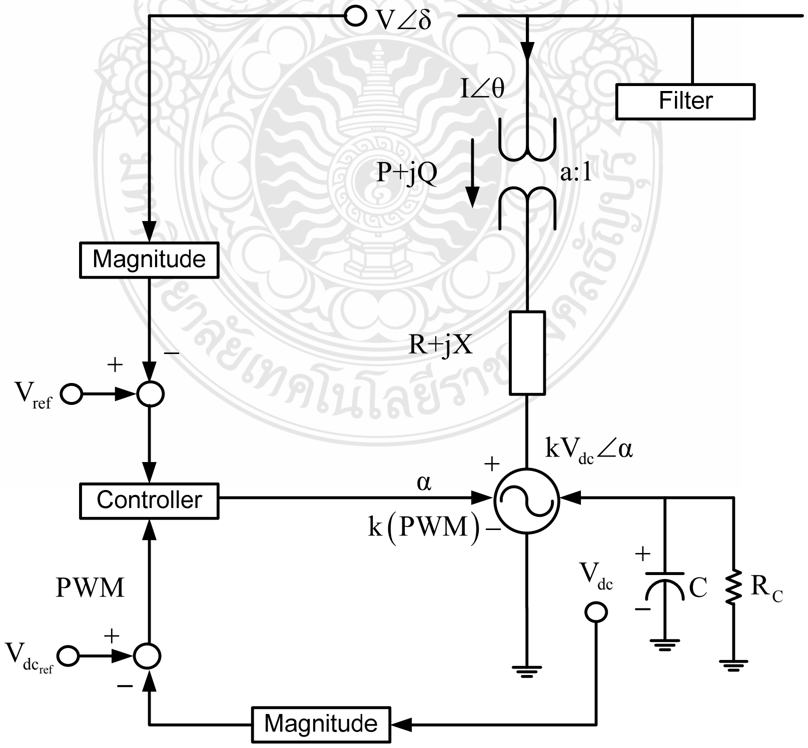
รูปที่ 2.21 ลักษณะการติดตั้งของ STATCOM [21]

STATCOM เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ต่อในลักษณะขนานเข้ากับระบบ โดยใช้หลักการของ

ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของ STATCOM ประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าจากวงจรแปลงผัน โดยวงจรแปลงผันจะทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งมีการควบคุมระดับความถี่ให้เท่ากับระบบที่เชื่อมต่อ และชดเชยค่ากำลังไฟฟ้าจริงและ

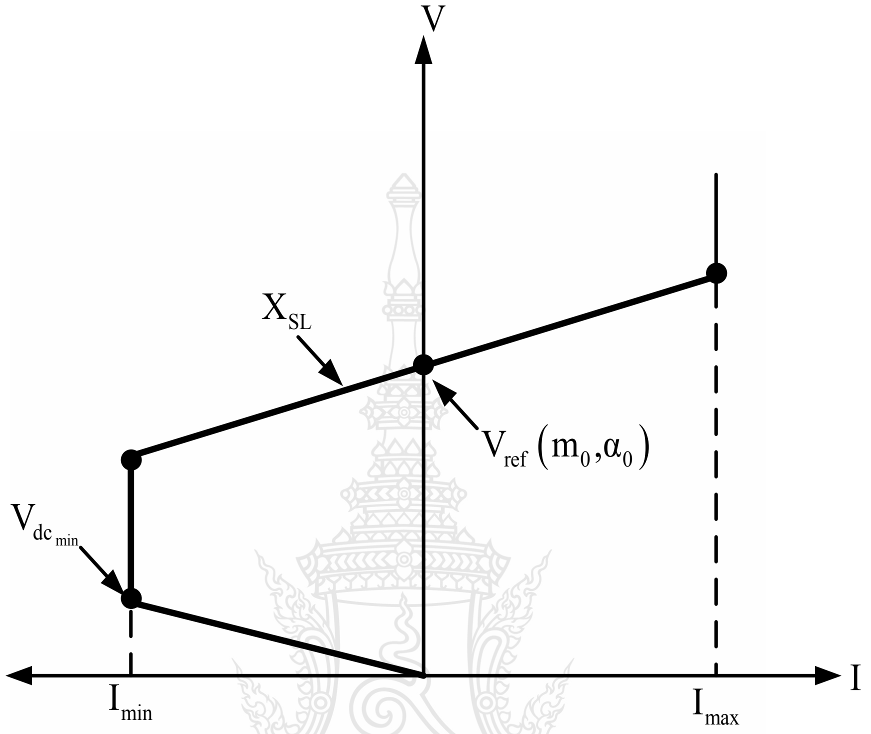


รูปที่ 2.22 ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของ STATCOM



รูปที่ 2.23 แบบจำลองของ STATCOM

การควบคุมของ STATCOM มี 2 วิธี คือ การควบคุมมุมเฟสเป็นการควบคุมการเลื่อนมุมเฟส(α) ที่ควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าของ STATCOM และอีกวิธีหนึ่งคือ การควบคุมโดยการสร้างสัญญาณ PWM เพื่อควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าของ STATCOM และมุมเฟส



รูปที่ 2.24 คุณลักษณะเฉพาะแรงดันและกระแสไฟฟ้าของ STATCOM

แบบจำลองของ STATCOM มีข้อจำกัดระหว่างการควบคุมและการทำงาน โดยทั่วไปจะนิยมให้แบบจำลองของ STATCOM มีลักษณะเดียวกับเครื่องจักรซิงโครนัส ซึ่งสมการเชิงอนุพันธ์แบบจำลองของ STATCOM สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเปอร์ยูนิตได้ ดังสมการที่ (2.31) สมการที่ (2.32) และสมการที่ (2.33) ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{\alpha} \\ \dot{m} \end{bmatrix} = f\left(x_c,\alpha,m,V,V_{dc},V_{ref},V_{dc_{ref}}\right) \tag{2.31}$$

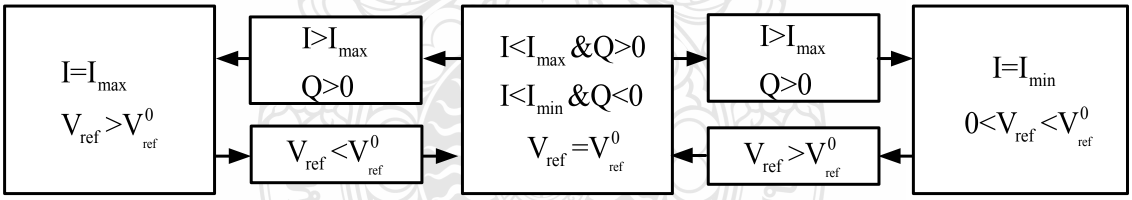
$$\dot{V}_{dc} = \frac{VI}{CV_{dc}}\cos\left(\delta-\theta\right) - \frac{1}{R_cC}V_{dc} - \frac{R}{C}\frac{I^2}{V_{dc}} \tag{2.32}$$

$$0=\underbrace{\begin{bmatrix} P-VI\cos(\delta-\theta) \\ Q-VI\sin(\delta-\theta) \\ P-V^2G+kV_{dc}VG\cos(\delta-\alpha)+kV_{dc}VB\sin(\delta-\alpha) \\ Q+V^2B+kV_{dc}VB\mathrm{Cos}(\delta-\alpha)+kV_{dc}VG\mathrm{Sin}(\delta-\alpha) \end{bmatrix}}_{g(\alpha,k,V,V_{dc},\delta,I,\theta,P,Q)} \tag{2.33}$$

เมื่อ m คือ ค่ามอดูเลชั่นของอุปกรณ์แปลงผัน X_c และ f(.) สำหรับปรับการควบคุมระบบและสมการตามลำดับ จากสมการที่ (2.31) สมการที่ (2.32) และสมการที่ (3.33) แบบจำลองของ STATCOM ในสภาวะคงตัวสามารถเขียนแทนได้ ดังสมการที่ (2.34)

$$0=\begin{bmatrix} V-V_{ref}\pm X_{SL}I \\ V_{dc}-V_{dc_{ref}} \\ P-V_{dc}^2/R_c-RI^2 \\ g(\alpha,k,V,V_{dc},\delta,I,\theta,P,Q) \end{bmatrix} \tag{2.34}$$

การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบที่มี STATCOM ในสภาวะคงตัว การจำกัดขอบเขตของกระแสของแบบจำลองในสภาวะคงตัวที่ดีนั้น อัตราส่วนของการมอดูเลชั่น k หรือมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าสามารถทำงานร่วมกันได้ในแบบจำลองที่นำเสนอ แสดงดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 การจำกัดขอบเขตการควบคุมในแบบจำลองสภาวะคงตัวของของ STATCOM

2.8 สรุปผลทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า พบว่าระบบจำหน่ายแบบเรเดียลเป็นระบบที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำและมีกระแสไหลในสายมากกว่าระบบส่งจ่ายไฟฟ้า เป็นระบบที่เชื่อมต่อระหว่างระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากับผู้ใช้ไฟฟ้าจึงเป็นระบบที่มีความสำคัญ เพราะส่งผลกระทบกับผู้ใช้ไฟฟ้าโดยตรง เมื่อกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าสูง ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพของกำลังไฟฟ้าในระบบ ส่งผลให้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าลดลง จากงานวิจัยที่ผ่านมาอุปกรณ์ที่ใช้ในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น เช่น การติดตั้งสวิตช์ตัดตอนในระบบจำหน่ายซึ่งมาจากปัญหาการขาดความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่าย การติดตั้งคาปาซิเตอร์แบงค์ การติดตั้งเครื่อง

บทที่ 3
วิธีดำเนินการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการวิเคราะห์หาตำแหน่งการติดตั้ง FACTS ที่เหมาะสมในระบบจำหน่าย โดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาค โดยผู้ทำวิทยานิพนธ์ได้ใช้โปรแกรม MATLAB M-File เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ระบบ ซึ่งเลือกใช้แบบจำลองระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE เป็นต้นแบบ [22] โดยอาศัยข้อมูลของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าและหาตำแหน่งการติดตั้ง FACTS ที่เหมาะสมของระบบจำหน่ายแล้วจึงนำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ไปพล็อตกราฟ จากนั้นทำการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าจากผลการจำลองระบบจำหน่าย ดูว่าบัสไหนของระบบจำหน่ายที่ติดตั้ง FACTS เข้าไปแล้ว กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสูญเสียต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับบัสอื่น ๆ กล่าวคือ เป็นบัสที่เหมาะสมในการติดตั้ง FACTS เข้าไปในระบบจำหน่าย เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่าย โดยใช้ FACTS 2 ชนิด คือ แบบต่อขนาน SVC และ STATCOM ซึ่งผู้ทำวิทยานิพนธ์ได้ดำเนินการตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

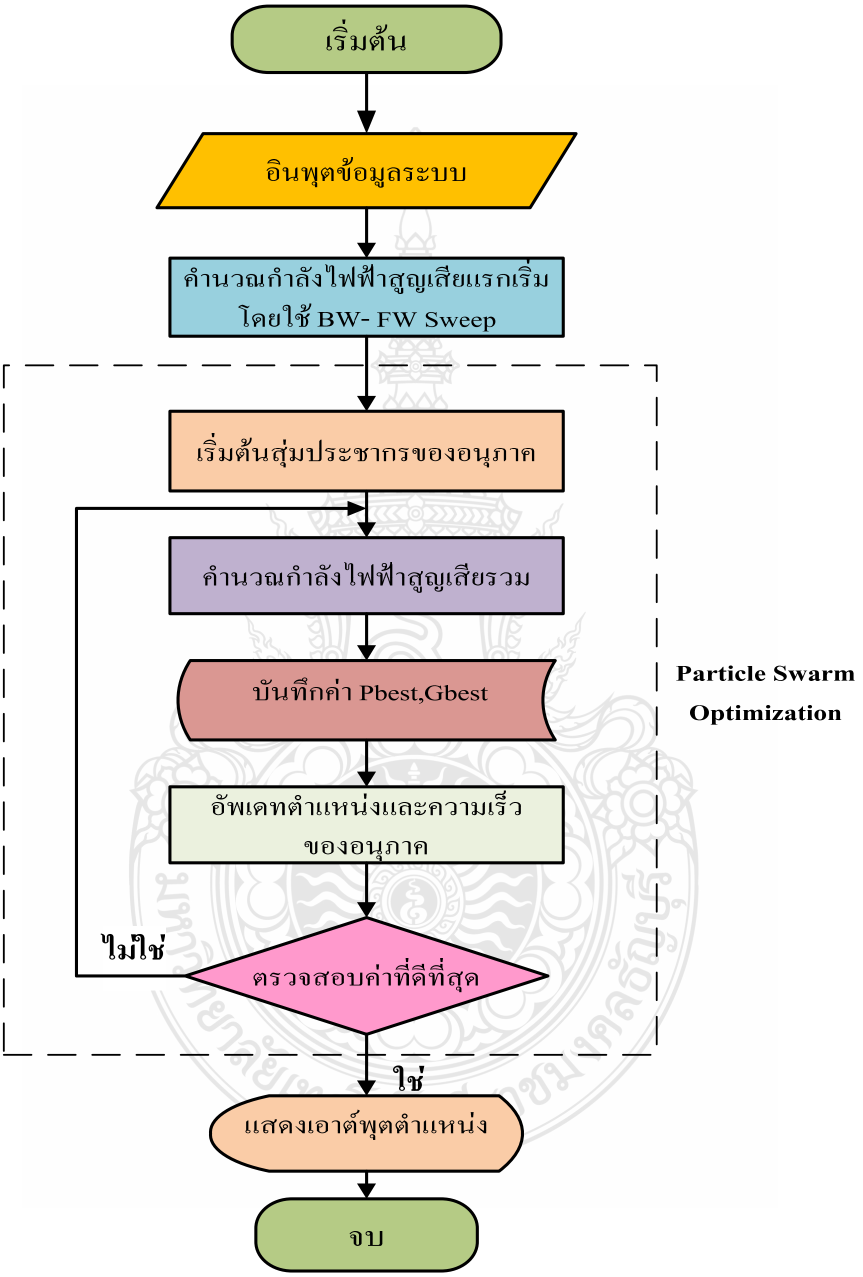
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการโดยใช้โปรแกรม MATLAB M-File

วิทยานิพนธ์นี้จะใช้โปรแกรม MATLAB M-File เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายมีขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 3.1 ซึ่งใช้วิธีกลุ่มอนุภาคในการหาตำแหน่งติดตั้ง FACTS ที่เหมาะสม โดยมีรายละเอียดลำดับขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. รับข้อมูลสาขา ข้อมูลบัส และขอบเขตของแรงดันไฟฟ้าที่บัส
2. คำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยใช้การไหลของโหลดโดยคำนวณกระแสแบบย้อนกลับและคำนวณแรงดันไฟฟ้าแบบไปข้างหน้า
3. สุ่มประชากรเริ่มต้นของอนุภาคกับสุ่มตำแหน่งและสุ่มความเร็วในการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของอนุภาค โดยตั้งค่ารอบตัวนับซ้ำ k = 0
4. แต่ละอนุภาคหากแรงดันไฟฟ้าที่บัสอยู่ในขอบเขตที่กำหนด การคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมดจะอยู่ในสมการที่ (2.11)
5. แต่ละอนุภาคเปรียบเทียบค่าเป้าหมายกับอนุภาคที่ดีที่สุด ถ้าค่าเป้าหมายต่ำกว่า Pbest ให้กำหนดค่าปัจจุบันนี้เป็น Pbest และบันทึกตำแหน่งของอนุภาคที่สอดคล้องกัน
6. เก็บค่าที่ดีของแต่ละอนุภาคไว้ในตัวแปร Pbest และเก็บค่าที่ดีที่สุดของอนุภาคทั้งหมดไว้ในตัวแปร Gbest
7. ปรับปรุงความเร็วและตำแหน่งของอนุภาคโดยใช้สมการที่ (2.25) และสมการที่ (2.26) ตามลำดับ

8. ถ้าจำนวนรอบถึงขีดจำกัดสูงสุดให้ไปที่ขั้นตอนที่ 9 ถ้าไม่เช่นนั้นให้ตั้งค่ารอบ k= k + 1 และกลับไปยังขั้นตอนที่ 4

9. แสดงผลฟังก์ชันเป้าหมายที่ดีที่สุดสำหรับตำแหน่งที่เหมาะสมที่จะติดตั้ง FACTS และเพื่อให้สอดคล้องกับระบบให้มีกำลังไฟฟ้าจริงสูญเสียรวมต่ำที่สุด



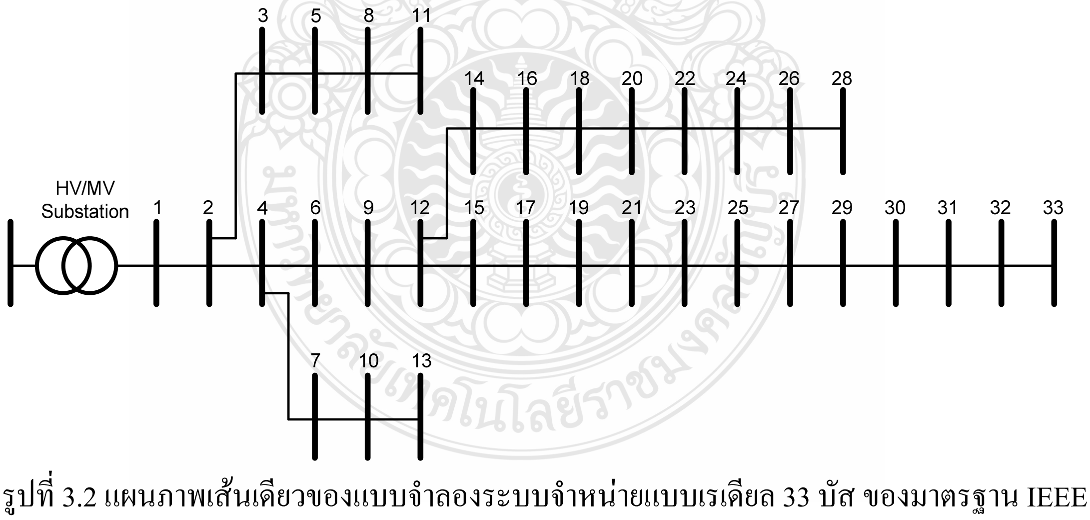
รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB M-File

จากรูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB M-File เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่าย ในกรณีศึกษาดังต่อไปนี้

1. การศึกษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์
2. การศึกษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายที่มีการติดตั้ง FACTS แบบต่อขนานโดยใช้ SVC
3. การศึกษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายที่มีการติดตั้ง FACTS แบบต่อขนานโดยใช้ STATCOM

3.2 ศึกษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังที่นำมาใช้

ระบบจำหน่ายที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ คือ แบบจำลองระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE โดยการนำข้อมูลต่าง ๆ ของระบบจำหน่ายมาใช้ในโปรแกรม MATLAB M-File เพื่อทำการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าจากกราฟและผลการจำลองระบบจำหน่าย ดูว่าบัสไหนของระบบจำหน่ายที่ติดตั้ง FACTS เข้าไปแล้ว กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสูญเสียต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับบัสอื่น ๆ จะเป็นบัสที่เหมาะสมในการติดตั้ง FACTS เข้าไปในระบบจำหน่าย เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่าย แผนภาพเส้นเดียวของแบบจำลองระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE แสดงดังรูปที่ 3.2

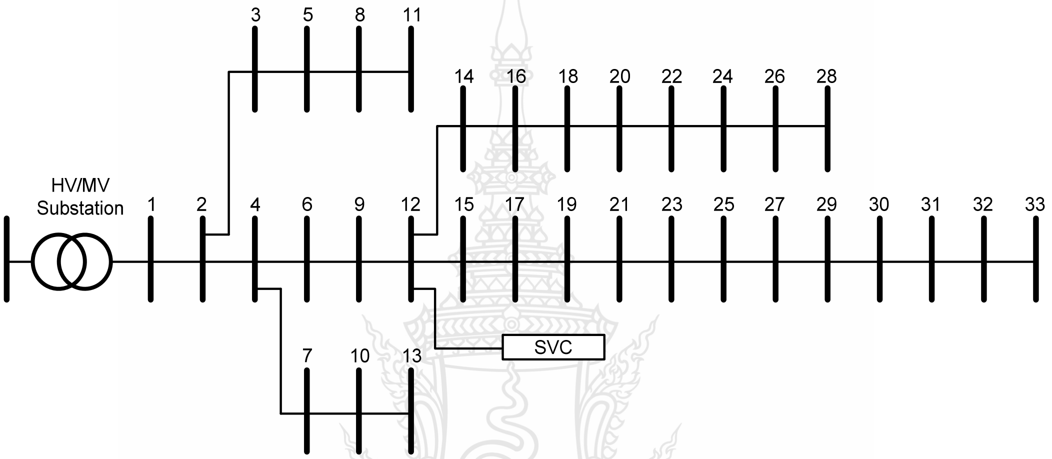


รูปที่ 3.2 แผนภาพเส้นเดียวของแบบจำลองระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE

จากรูปที่ 3.2 แสดงแผนภาพเส้นเดียวของแบบจำลองระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE ที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์ โดยระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE จะมีกำลังไฟฟ้ารวมของโหลดเท่ากับ 3.72 MW และ 2.3 MVar กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่สูญเสียรวมในระบบจะตั้งอยู่ที่ 221.4346 kW และ 150.1784 kVar ตามลำดับ ในวิทยานิพนธ์นี้ แบบจำลองระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE ใช้กำลังไฟฟ้าปรากฏฐานเท่ากับ

3.3 การศึกษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าที่มีการติดตั้ง SVC เข้าในระบบ

ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE เมื่อมีการมีติดตั้ง FACTS แบบต่อขนาน โดยใช้ SVC ขนาด 2.4431 MVA



รูปที่ 3.3 แบบจำลองระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE หลังติดตั้ง SVC

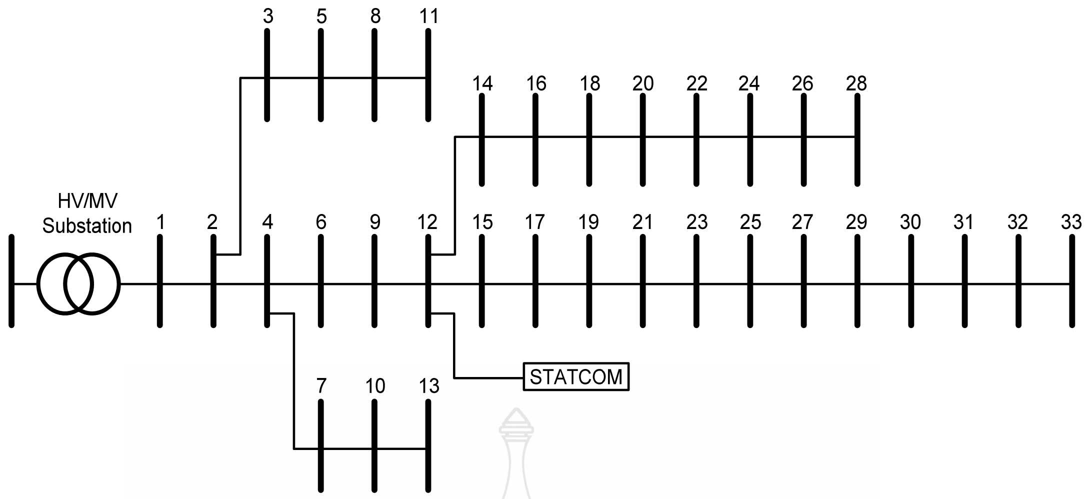
จากรูปที่ 3.3 แสดงตัวอย่างของการติดตั้ง SVC ขนาด 2.4431 MVA ที่บัสที่ 12 ในระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE ที่มีกำลังไฟฟ้ารวมของโหลดเท่ากับ 3.72 MW และ 2.3 MVar ข้อมูลของ SVC แสดงไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลของ SVC ขนาด 2.4431 MVA ที่ติดตั้งในตำแหน่งของบัสที่ 12

SVC DATA						
Bus No.	**kV**	X_C	X_L	α_{min}	α_{max}	**MVA**
12	12.66	1.1708	0.4925	90	175	2.4431

3.4 การศึกษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าที่มีการติดตั้ง STATCOM เข้าในระบบ

ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE เมื่อมีการมีติดตั้ง FACTS แบบต่อขนาน โดยใช้ STATCOM ขนาด 2.4939 MVA



รูปที่ 3.4 แบบจำลองระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE หลังติดตั้ง STATCOM

จากรูปที่ 3.4 แสดงตัวอย่างของการติดตั้ง STATCOM ขนาด 2.4939 MVA ที่บัสที่ 12 ในระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE ที่มีกำลังไฟฟ้ารวมของโหลดเท่ากับ 3.72 MW และ 2.3 MVar ข้อมูลของ STATCOM แสดงไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลของ STATCOM ขนาด 2.4939 MVA ที่ติดตั้งในตำแหน่งของบัสที่ 12

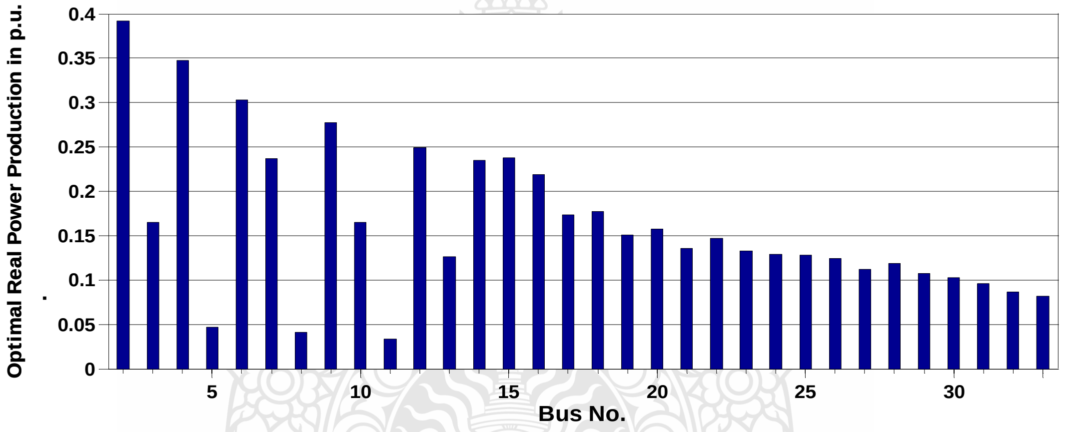
STATCOM DATA							
Bus No.	**kV**	**R**	**X**	$\mathbf{R_C}$	**k**	$\mathbf{X_{sl}}$	**MVA**
12	12.66	0	0.145	0.0017	0.9	2	2.4939

3.5 สรุป

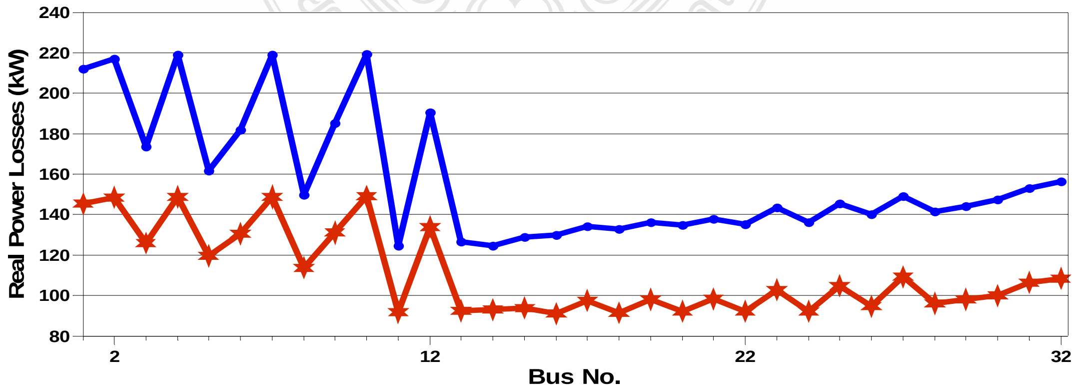
วิทยานิพนธ์นี้ใช้โปรแกรม MATLAB M-File เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่าย โดยใช้ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE เป็นระบบอ้างอิงที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์ เพื่อการศึกษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายก่อนติดตั้ง FACTS และการศึกษาเสถียรภาพของระบบจำหน่ายที่มีการติดตั้ง FACTS เข้าไปในระบบจำหน่ายแล้ว โดยระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์มีกำลังไฟฟ้ารวมของโหลดเท่ากับ 3.72 MW และ 2.3 MVar กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่สูญเสียรวมในระบบจะตั้งอยู่ที่ 221.4346 kW และ 150.1784 kVar โดยใช้กำลังไฟฟ้าปรากฏฐานเท่ากับ 10 MVA และแรงดันไฟฟ้าฐานเท่ากับ 12.66 kV และขนาดของ FACTS แบบต่อขนาน SVC มีขนาดเท่ากับ 2.4431 MVA และ STATCOM มีขนาดเท่ากับ 2.4939 MVA ตามลำดับ

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิเคราะห์

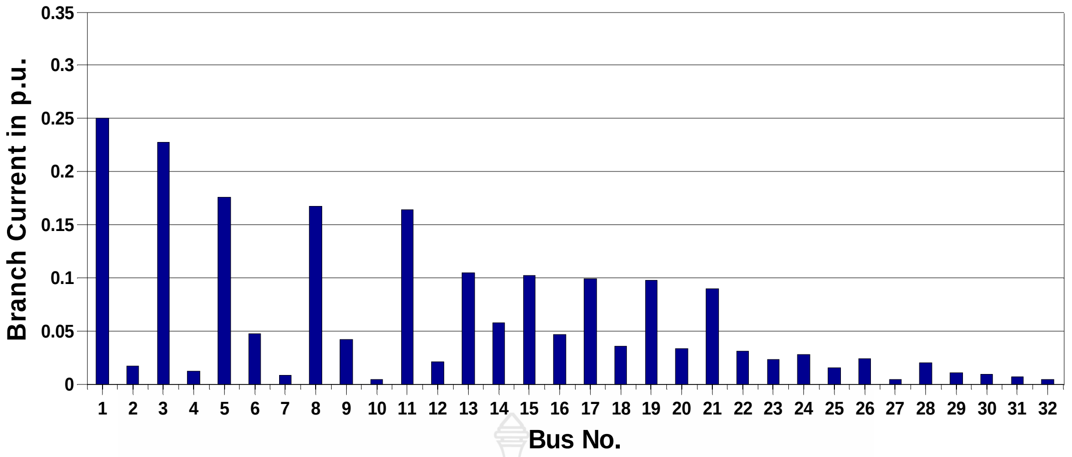
ระบบที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ คือ ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE โดยการนำข้อมูลต่าง ๆ ของระบบมาใช้ในโปรแกรม MATLAB M-File เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบและหาบัสที่เหมาะสมในการติดตั้ง FACTS เข้าไปในระบบจำหน่าย โดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาคในการหาตำแหน่งที่เหมาะสม ดูว่าบัสไหนของระบบจำหน่ายที่ติดตั้ง FACTS เข้าไปแล้วกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสูญเสียต่ำที่สุด ก็จะเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้ง FACTS เข้าไปในระบบจำหน่าย เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ โดยใช้ FACTS 2 ชนิด คือ SVC และ STATCOM ผลการจำลองค่าต่าง ๆ ของระบบจำหน่าย แสดงดังรูปต่อไปนี้



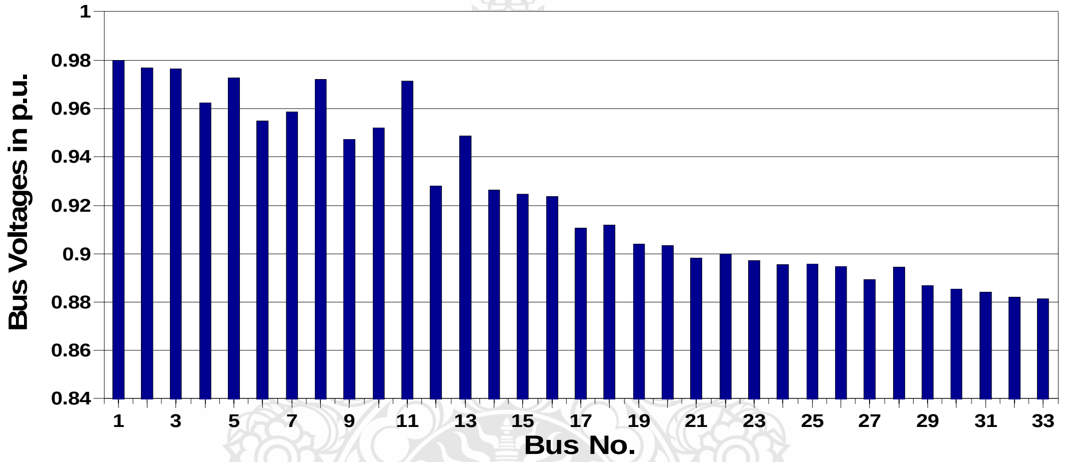
รูปที่ 4.1 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่เหมาะสมของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE



รูปที่ 4.2 ค่าโดยประมาณกับค่ากำลังไฟฟ้าจริงสูญเสียที่ต้องการของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE



รูปที่ 4.3 ขนาดกระแสที่สาขาต่าง ๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE



รูปที่ 4.4 ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่าง ๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE

จากรูปที่ 4.4 ผลของแบบจำลองระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE ที่มีกำลังไฟฟ้ารวมของโหลดเท่ากับ 3.72 MW และ 2.3 MVar กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่สูญเสียรวมในระบบจะตั้งอยู่ที่ 221.4346 kW และ 150.1784 kVar โดยใช้กำลังไฟฟ้าปรากฏเท่ากับ 10 MVA และแรงดันไฟฟ้าฐานเท่ากับ 12.66 kV ผลการจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบกระแสย้อนกลับและแรงดันไฟฟ้าแบบไปข้างหน้าของระบบจำหน่ายแล้วพบว่า ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 มีค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0.98 p.u. ส่วนบัสอื่น ๆ ที่อยู่ไกลออกไปแรงดันไฟฟ้าที่บัสจะลดลงเรื่อย ๆ โดยเฉพาะที่ปลายสาย คือ บัสที่ 33 ซึ่งเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดจะมีแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด มีค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0.881373 p.u. และหลังจากจำลองการติดตั้ง FACTS เข้าไปในระบบจำหน่ายโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาคหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดแล้ว ได้บัสที่เหมาะสมในการติดตั้ง FACTS เข้าไปในระบบจำหน่าย คือ บัสที่ 12 เพราะกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสูญเสียต่ำที่สุดเมื่อ

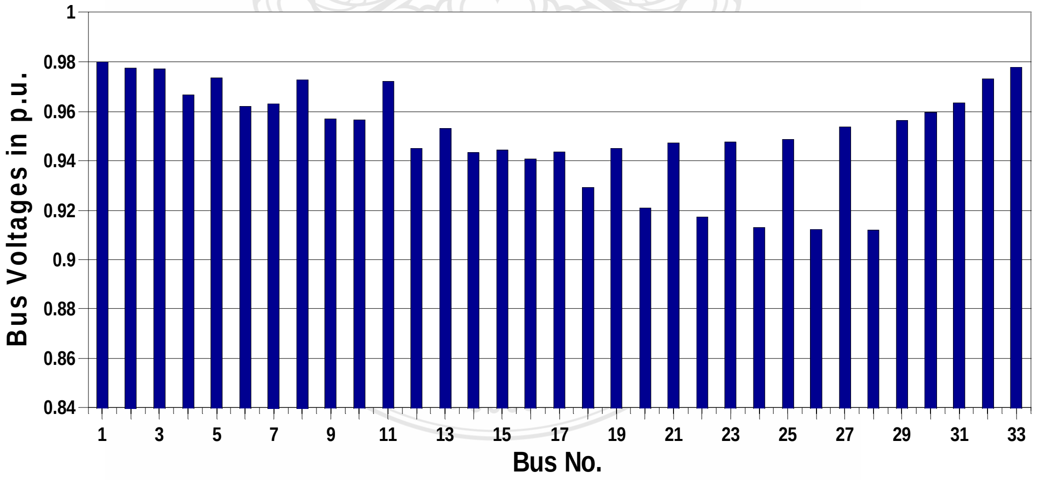
ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของ มาตรฐาน IEEE

Bus No.	**Voltage p.u.**	**Angle (Radians)**	**Angle (Degrees)**
1	0.980000	0.000000	0.000000
2	0.976920	0.000251	0.014381
3	0.976382	0.000052	0.002979
4	0.962435	0.001749	0.100210
5	0.972728	-0.001170	-0.067036
6	0.954758	0.002958	0.169480
7	0.958768	0.001192	0.068296
8	0.972010	-0.001520	-0.087089
9	0.947148	0.004193	0.240241
10	0.951955	-0.000420	-0.024064
11	0.971360	-0.001890	-0.108289
12	0.928222	0.002478	0.141978
13	0.948559	-0.001220	-0.069900
14	0.926237	0.003198	0.183231
15	0.924609	-0.001760	-0.100840
16	0.923616	0.004224	0.242017
17	0.910612	-0.004560	-0.261268
18	0.911888	0.005739	0.328820
19	0.904118	-0.005930	-0.339763
20	0.903467	0.007168	0.410696
21	0.898112	-0.007110	-0.407372
22	0.899822	0.009103	0.521563
23	0.897218	-0.006970	-0.399351
24	0.895557	0.007555	0.432869

ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE (ต่อ)

Bus No.	Voltage p.u.	Angle (Radians)	Angle (Degrees)
25	0.895664	-0.006760	-0.387319
26	0.894617	0.007132	0.408633
27	0.889331	-0.008460	-0.484722
28	0.894326	0.006991	0.400554
29	0.886983	-0.009940	-0.569520
30	0.885519	-0.010640	-0.609627
31	0.884101	-0.011080	-0.634837
32	0.882002	-0.012520	-0.717343
33	0.881373	-0.012700	-0.727656
กำลังไฟฟ้าสูญเสีย (kW)		221.4346 kW	

4.1 การปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายที่ติดตั้ง SVC



รูปที่ 4.5 ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่าง ๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE หลังติดตั้ง SVC

ในหัวข้อวิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE มีกำลังไฟฟ้ารวมของโหลดเท่ากับ 3.72 MW และ 2.3 MVar

หลังจากจำลองการติดตั้ง SVC เข้าไปโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาคหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดแล้ว ได้บัสที่เหมาะสมในการติดตั้ง SVC เข้าไปในระบบ คือ บัสที่ 12 โดยการติดตั้ง SVC ขนาด 2.4431 MVA มุมจุดชนวน α เท่ากับ 90° ต่อขนานเข้ากับระบบจำหน่าย ผลการจำลองค่าต่าง ๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE หลังติดตั้ง SVC แสดงดังรูปที่ 4.5 ตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ผลการจำลองค่าต่าง ๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE หลังติดตั้ง SVC

Bus No.	**SVC Size MVA**	**P_{loss} kW**	**Q_{loss} KVar**	**Base kV kV**	**Voltage p.u.**
2	3.7177	274.0090	135.4527	12.3766	0.977613
3	1.5768	280.3672	138.4400	12.3698	0.977074
4	3.3285	222.7545	116.7875	12.2396	0.966791
5	0.4602	282.9692	138.5794	12.3235	0.973423
6	2.9080	207.4799	111.1396	12.1765	0.961811
7	2.2847	233.3631	121.2164	12.1934	0.963141
8	0.4074	283.0948	138.5908	12.3145	0.972706
9	2.6800	192.4583	105.5894	12.1158	0.957013
10	1.6148	236.9958	121.7209	12.1075	0.956360
11	0.3292	283.5665	138.8343	12.3062	0.972056
12	**2.4431**	**160.3745**	**85.2280**	**11.9640**	**0.945022**
13	1.2366	244.0284	124.1527	12.0647	0.952979
14	2.3114	162.9829	85.9819	11.9393	0.943074
15	2.3315	161.3063	87.1492	11.9548	0.944296
16	2.1551	166.2557	87.0192	11.9068	0.940503

ตารางที่ 4.2 ผลการจำลองค่าต่าง ๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE หลังติดตั้ง SVC (ต่อ)

Bus No.	**SVC Size MVA**	**P_{loss} kW**	**Q_{loss} KVar**	**Base kV kV**	**Voltage p.u.**
17	1.7170	169.1077	86.0403	11.9458	0.943589
18	1.7657	173.3414	90.2351	11.7611	0.928997
19	1.5060	173.2861	86.8130	11.9639	0.945016
20	1.5814	176.0024	90.8349	11.6565	0.920735
21	1.3548	176.1842	87.4476	11.9885	0.946961
22	1.4831	178.4761	91.2422	11.6112	0.917159
23	1.3300	176.7823	87.4622	11.9935	0.947356
24	1.3094	185.6674	95.2996	11.5583	0.912975
25	1.2844	178.1469	87.6076	12.0047	0.948241
26	1.2576	188.5420	97.3076	11.5466	0.912054
27	1.1342	183.5291	90.2104	12.0690	0.953318
<u>28</u>	<u>1.1945</u>	<u>193.0908</u>	<u>101.8132</u>	<u>11.5430</u>	<u>0.911769</u>
29	1.0873	185.5801	91.8800	12.1025	0.955962
30	1.0351	188.8406	93.5708	12.1432	0.959181
31	0.9738	193.1782	95.3829	12.1956	0.963321
32	0.8787	200.8129	101.3804	12.3171	0.972913
33	0.8309	205.0104	103.0256	12.3787	0.977777

จากผลการจำลองของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE หลังติดตั้ง SVC ขนาด 2.4431 MVA เข้าไปในระบบจำหน่ายโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาคหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดแล้ว ได้บัสที่เหมาะสมในการติดตั้ง SVC เข้าไปในระบบจำหน่าย คือ บัสที่ 12 มีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสูญเสียเท่ากับ 160.3745 kW และ 85.2280 kVar ตามลำดับ เนื่องจากบัสที่ 12 มีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสูญเสียต่ำที่สุด จึงเหมาะที่จะติดตั้ง SVC เข้าไปในระบบจำหน่ายเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟในระบบจำหน่ายให้ดีขึ้น และยังทำให้แรงดันไฟฟ้าในทุก ๆ บัสดีขึ้นกว่าเดิม ส่วนบัสที่เป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดก็เปลี่ยนไปจากเดิมบัสที่ 33 ไปเป็นบัสที่ 28 ที่มีแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0.911769 p.u. ซึ่งเป็นผลมาจากการติดตั้ง SVC ขนาด 2.4431 MVA เข้าไปในระบบจำหน่าย แล้วทำให้บัสที่อ่อนแอที่สุดเปลี่ยนตำแหน่งไป

ตารางที่ 4.3 การหาตำแหน่งติดตั้ง SVC ที่เหมาะสมโดยใช้ PSO

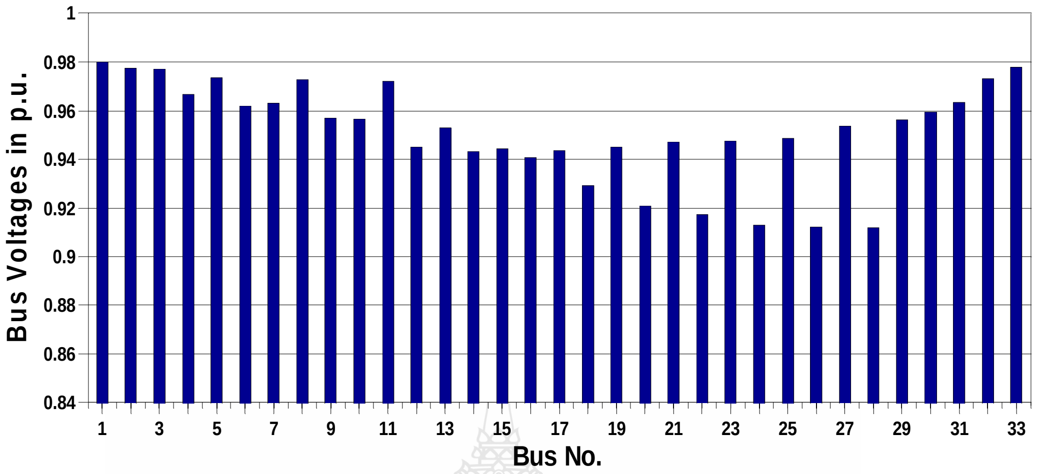
System	Method	Bus No.	SVC Size MVA	Ploss kW	Qloss kVar	Loss Reduction %	
						Real	Reactive
33 Bus	Load Flow Analysis			221.4346	150.1784		
	PSO	**<u>12</u>**	**<u>2.4431</u>**	**<u>160.3745</u>**	**<u>85.2280</u>**	**<u>27.57</u>**	**<u>43.24</u>**
		15	2.3315	161.3063	87.1492	27.15	41.96
		14	2.3114	162.9829	85.9819	26.39	42.74
		17	1.7170	169.1077	86.0403	23.63	42.70
		25	1.2844	178.1469	87.6076	19.54	41.66
		6	2.9080	207.4799	111.1396	6.30	25.99

จากตารางที่ 4.3 หลังจากติดตั้ง SVC เข้าไปในระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE ในตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมแล้ว สามารถลดกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสูญเสียในระบบได้ 27.57% และ 43.24% ตามลำดับ ทำให้ระบบมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้ามากขึ้น

4.2 การปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายที่ติดตั้ง STATCOM

ในหัวข้อวิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE มีกำลังไฟฟ้ารวมของโหลดเท่ากับ 3.72 MW และ 2.3 MVar กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่สูญเสียรวมในระบบจะตั้งอยู่ที่ 221.4346 kW และ 150.1784 kVar โดยใช้กำลังไฟฟ้าปรากฏฐานเท่ากับ 10 MVA และแรงดันไฟฟ้าฐานเท่ากับ 12.66 kV การจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าใช้แบบกระแสย้อนกลับและแรงดันไฟฟ้าแบบไปข้างหน้า และหาตำแหน่งการติดตั้ง STATCOM ที่เหมาะสมโดยวิธีกลุ่มอนุภาค กำหนดให้มีจำนวนอนุภาคในการคำนวณเท่ากับ 30 ค่าถ่วงน้ำหนัก W_{min} เท่ากับ 0.4 และ W_{max} เท่ากับ 0.9 ความเร็วในการค้นหาคำตอบเท่ากับ 0.5 ค่าความเร่ง C_1 เท่ากับ 2 และ C_2 เท่ากับ 2 และจำนวนรอบในการค้นหาเท่ากับ 100 รอบ

หลังจากจำลองการติดตั้ง STATCOM เข้าไปในระบบจำหน่ายโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาคหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดแล้ว ได้บัสที่เหมาะสมในการติดตั้ง STATCOM เข้าไปในระบบจำหน่าย คือ บัสที่ 12 โดยการติดตั้ง STATCOM ขนาด 2.4939 MVA มุมจุดชนวน α เท่ากับ 90° ต่อ



รูปที่ 4.6 ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่าง ๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE หลังติดตั้ง STATCOM

ตารางที่ 4.4 ผลการจำลองค่าต่าง ๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE หลังติดตั้ง STATCOM

Bus No.	**STATCOM Size MVA**	**P_{loss} kW**	**Q_{loss} KVar**	**Base kV kV**	**Voltage p.u.**
2	3.9234	274.0596	135.4762	12.3765	0.977609
3	1.6518	280.3923	138.5535	12.3697	0.977071
4	3.4796	222.9034	116.8124	12.2393	0.966772
5	0.4706	282.9817	138.6208	12.3235	0.973420
6	3.0298	207.6376	111.1676	12.1762	0.961781
7	2.3662	233.4468	121.3599	12.1931	0.963122
8	0.4156	283.1068	138.6318	12.3144	0.972702
9	2.7782	192.6051	105.6203	12.1153	0.956971
10	1.6515	237.0357	121.8752	12.1073	0.956341
11	0.3354	283.5781	138.8764	12.3062	0.972052
12	**2.4939**	**160.4509**	**85.3447**	**11.9634**	**0.944972**
13	1.2584	244.0549	124.2787	12.0645	0.952960

ตารางที่ 4.4 ผลการจำลองค่าต่าง ๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE หลังติดตั้ง STATCOM (ต่อ)

Bus No.	STATCOM Size MVA	P_{loss} kW	Q_{loss} KVar	Base kV kV	Voltage p.u.
14	2.3545	163.0485	86.0639	11.9387	0.943024
15	2.3801	161.3696	87.6981	11.9545	0.944276
16	2.1892	166.3092	87.0696	11.9061	0.940453
17	1.7321	169.12	86.1770	11.9452	0.943539
18	1.7739	173.3665	90.3016	11.7605	0.928946
19	1.5111	173.2848	86.8586	11.9631	0.944948
20	1.5752	176.0275	90.8200	11.6559	0.920684
21	1.3525	176.1755	87.4400	11.9875	0.946876
22	1.4707	178.5065	91.1995	11.6106	0.917108
23	1.3264	176.7733	87.4499	11.9923	0.947262
24	1.2954	185.7033	95.1948	11.5576	0.912924
25	1.2786	178.1378	87.5945	12.0033	0.948130
26	1.2439	188.5788	97.1797	11.5460	0.912002
27	1.1235	183.5165	90.1754	12.0674	0.953189
28	1.1828	193.1262	101.6544	11.5423	0.911717
29	1.0761	185.5641	91.8098	12.1010	0.955846
30	1.0236	188.8221	93.4928	12.1417	0.959062
31	0.9618	193.1576	95.3109	12.1940	0.963189
32	0.8682	200.7813	101.2478	12.3158	0.972810
33	0.8204	204.9763	102.9034	12.3772	0.977665

จากผลการจำลองของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE หลังติดตั้ง STATCOM ขนาด 2.4939 MVA เข้าไปในระบบจำหน่ายโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาคหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดแล้ว ได้บัสที่เหมาะสมในการติดตั้ง STATCOM เข้าไปในระบบจำหน่าย คือ บัสที่ 12 มีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสูญเสียเท่ากับ 160.4509 kW และ 85.3447 kVar ตามลำดับ เนื่องจากบัสที่ 12 มีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสูญเสียต่ำที่สุด จึงเหมาะที่จะติดตั้ง STATCOM เข้าไปในระบบจำหน่ายเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟในระบบจำหน่ายให้ดีขึ้น และยัง

ตารางที่ 4.5 การหาตำแหน่งติดตั้ง STATCOM ที่เหมาะสมโดยใช้ PSO

System	Method	Bus No.	STATCOM Size MVA	Ploss kW	Qloss kVar	Loss Reduction %	
						Real	Reactive
33 Bus	Load Flow Analysis			221.4346	150.1784		
	PSO	**12**	**2.4939**	**160.4509**	**85.3447**	**27.54**	**43.17**
		15	2.3801	161.3696	87.6981	27.12	41.60
		14	2.3545	163.0485	86.0639	26.36	42.69
		17	1.7321	169.1200	86.1770	23.62	42.61
		25	1.2786	178.1378	87.5945	19.55	41.67
		6	3.0298	207.6376	111.1676	6.23	25.97

จากตารางที่ 4.5 หลังจากติดตั้ง STATCOM เข้าไปในระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE ในตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมแล้ว สามารถลดกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสูญเสียในระบบได้ 27.54% และ 43.17% ตามลำดับ ทำให้ระบบมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้ามากขึ้น

4.3 สรุป

ผลการทดลองการศึกษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของแบบจำลองระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE ที่มีกำลังไฟฟ้ารวมของโหลดเท่ากับ 3.72 MW และ 2.3 MVar กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่สูญเสียรวมในระบบจะตั้งอยู่ที่ 221.4346 kW และ 150.1784 kVar โดยใช้กำลังไฟฟ้าปรากฏฐานเท่ากับ 10 MVA และแรงดันไฟฟ้าฐานเท่ากับ 12.66 kV ผลการจำลองก่อนการติดตั้ง FACTS เข้าไปในระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ได้จากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบกระแสย้อนกลับและแรงดันไฟฟ้าแบบไปข้างหน้า พบว่าที่บัสที่ 1 มีค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0.98 p.u. ส่วนบัสอื่น ๆ ที่อยู่ไกลออกไปแรงดันไฟฟ้าที่บัสจะลดลงเรื่อย ๆ โดยเฉพาะที่ปลายสาย คือ บัสที่ 33 จะเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดใน

บทที่ 5
สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ผลการวิเคราะห์หาตำแหน่งการติดตั้ง FACTS ที่เหมาะสมในระบบจำหน่ายโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาค สามารถสรุปผลการทดลองได้ ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผล

จากผลการวิเคราะห์หาตำแหน่งการติดตั้ง FACTS ที่เหมาะสมในระบบจำหน่ายโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาค เพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเข้าสู่ระบบและปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่าย สามารถสรุปประเด็นการวิเคราะห์ได้ดังต่อไปนี้

ระบบจำหน่ายที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE มีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟรวมของโหลดเท่ากับ 3.72 MW และ 2.3 MVar ตามลำดับ กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่สูญเสียรวมในระบบจะตั้งอยู่ที่ 221.4346 kW และ 150.1784 kVar ตามลำดับ และระบบจำหน่ายนี้ใช้กำลังไฟฟ้าปรากฏฐานเท่ากับ 10 MVA และแรงดันไฟฟ้าฐานเท่ากับ 12.66 kV

ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ได้จากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบกระแสย้อนกลับและแรงดันไฟฟ้าแบบไปข้างหน้า พบว่าแรงดันไฟฟ้าบัสที่ 1 มีค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0.98 p.u. ส่วนบัสอื่น ๆ ที่อยู่ไกลออกไปจากสถานีไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้าที่บัสจะลดลงเรื่อย ๆ โดยเฉพาะที่ปลายสาย คือ บัสที่ 33 จะเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดในระบบจำหน่ายมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสเท่ากับ 0.881373 p.u.

หลังจากจำลองการติดตั้ง FACTS ทั้ง 2 ชนิด เข้าไปในระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE โดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาคหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดแล้ว ได้บัสที่เหมาะสมในการติดตั้ง SVC และ STATCOM เข้าไปในระบบจำหน่าย คือ บัสที่ 12 หลังติดตั้ง SVC ขนาด 2.4431 MVA เข้าไปในระบบจำหน่ายที่บัสที่ 12 ทำให้มีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสูญเสียเท่ากับ 160.3745 kW และ 85.2280 kVar ตามลำดับ และหลังติดตั้ง STATCOM ขนาด 2.4939 MVA ทำให้มีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสูญเสียเท่ากับ 160.4509 kW และ 85.3447 kVar ตามลำดับ เนื่องจากบัสที่ 12 มีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสูญเสียต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับบัสอื่น ๆ ในระบบจำหน่าย จึงเหมาะที่จะติดตั้ง SVC และ STATCOM เข้าไปเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟในระบบจำหน่ายให้ดีขึ้น

การติดตั้ง SVC เข้าไปในระบบจำหน่ายที่บัสที่ 12 สามารถลดกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสูญเสียได้ถึง 27.57% และ 43.24% ตามลำดับ ส่วนตำแหน่งที่เหมาะสมถัดมาโดยการค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค คือ บัสที่ 15 สามารถลดกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอค

ซึ่งหากเปรียบเทียบกันระหว่างการติดตั้ง FACTS ทั้ง 2 ชนิด การติดตั้ง SVC มีความเหมาะสมมากกว่าการติดตั้ง STATCOM เข้าไปในระบบจำหน่าย เนื่องจากใช้ขนาดกำลังไฟฟ้าปรากฏที่เล็กกว่า แต่ได้เปอร์เซ็นต์ในการลดกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสูญเสียที่มากกว่า

บัสที่เป็นบัสอ่อนแอที่สุดเปลี่ยนตำแหน่งไปหลังจากการติดตั้ง SVC เข้าไปในระบบจำหน่าย จากเดิมบัสที่ 33 ไปเป็นบัสที่ 28 มีแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0.911769 p.u. และหลังจากการติดตั้ง STATCOM เข้าไปในระบบจำหน่าย ก็ทำให้เปลี่ยนตำแหน่งจากเดิมบัสที่ 33 ไปเป็นบัสที่ 28 เช่นกัน มีแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0.911769 p.u. ซึ่งเป็นผลมาจากการติดตั้ง SVC และ STATCOM เข้าไปในระบบจำหน่าย แล้วทำให้บัสที่อ่อนแอที่สุดเปลี่ยนตำแหน่งไป

เมื่อปรับมุมจุดชนวน α ของไทริสเตอร์มากกว่า 90° จะทำให้กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสูญเสียในระบบเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย แต่การเปลี่ยนแปลงระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสูญเสียเมื่อมุมจุดชนวน α ของไทริสเตอร์มากขึ้น การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงสูญเสียจะเปลี่ยนแปลงมากกว่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสูญเสีย ซึ่งกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสูญเสียจะเปลี่ยนแปลงค่าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อมุมมุมจุดชนวน α ของไทริสเตอร์มากขึ้น

เมื่อปรับเปลี่ยนค่าความเร็วในการค้นหาคำตอบให้มากกว่า 0.5 จะทำให้การค้นหาคำตอบรวดเร็วขึ้นใช้เวลาน้อยลง แต่คำตอบจะตกอยู่กับคำตอบเฉพาะที่และการค้นหาคำตอบจะไม่คลอบคลุมขอบเขตทั้งหมด

เมื่อปรับเปลี่ยนค่าคงที่ความเร่ง C_1 และ C_2 ให้มากขึ้นหรือน้อยลงกว่าค่าที่ตั้งไว้ คือ 2 จะมีผลในการลู่เข้าสู่คำตอบ หากค่าคงที่ C_1 และ C_2 มีค่าต่ำทั้งคู่จะส่งผลให้การค้นหาคำตอบห่างไกลจากเป้าหมาย เนื่องจากอนุภาคมีอัตราเร่งในการเคลื่อนที่ต่ำจึงวนอยู่กับคำตอบเฉพาะที่ หากค่าคงที่ C_1 และ C_2 มีค่าสูงทั้งคู่ จะส่งผลให้การค้นหาคำตอบเกิดการเคลื่อนที่ผ่านเป้าหมายไป เนื่องจากอนุภาคมีอัตราเร่งในการเคลื่อนที่สูงทำให้ไม่เจอคำตอบ หากค่าคงที่ C_1 มีค่าต่ำ และ C_2 มีค่าสูง จะทำให้การค้นหาคำตอบลู่เข้าสู่คำตอบอย่างรวดเร็ว แต่คำตอบที่ได้ส่วนใหญ่จะเป็นคำตอบเฉพาะที่ และหากค่าคงที่ C_1 มีค่าสูง และ C_2 มีค่าต่ำ จะทำให้เกิดการค้นหาคำตอบในแต่ละพื้นที่เป็นแบบกระจัดกระจายไม่เป็นรูปแบบที่สอดคล้องกันทำให้ไม่สามารถลู่เข้าสู่คำตอบที่ดีได้ ดังนั้นค่าความเร่งที่เหมาะสม คือ 2

ผลจากการวิเคราะห์หาตำแหน่งการติดตั้ง FACTS ที่เหมาะสมในระบบจำหน่ายโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาค เพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเข้าสู่ระบบและปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบ

5.2 ข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาเฉพาะการวิเคราะห์หาตำแหน่งการติดตั้ง FACTS ที่เหมาะสมในของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE เพื่อหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่เป็นไปได้จริง ระบบที่ทดสอบเป็นระบบสามเฟสแบบสมดุล พิจารณาเฉพาะการทำงานในช่วงเวลาคงตัว แบบจำลองโหลดจะใช้เป็นค่ากำลังคงที่ วิทยานิพนธ์นี้ไม่เน้นถึงการพิจารณาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าทางด้านอื่น ๆ ดังนั้นหากที่ผู้สนใจในวิทยานิพนธ์นี้ควรมีการศึกษาและพิจารณาเพิ่มเติมดังต่อไปนี้

1. พิจารณาระบบที่ทดสอบไม่ใช่ระบบสามเฟสแบบสมดุล
2. พิจารณาการทำงานในช่วงเวลาไม่คงตัว
3. พิจารณาแบบจำลองโหลดใช้เป็นค่ากำลังที่เปลี่ยนแปลง เพื่อให้ใกล้เคียงกับระบบที่ใช้งานจริงในปัจจุบัน
4. พิจารณาระบบที่ใหญ่กว่า เช่น IEEE 69 บัส และ IEEE 118 บัส เป็นต้น
5. มี FACTS อีกหลายชนิดที่น่าสนใจนำมาศึกษาในการเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น SSSC UPFC และ IPFC เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

[1] P. Kundur, **“Power System Stability and Control”,** Chapter 1 General Characteristics of Modern Power Systems, New York:McGraw-Hill, 1994. pp. 3-16.

[2] M. Brain , **“How Power Grid Work”,** [serial online]. 2007. [cited 2011 Jan 13]. Available from: URL : http://www.science.smith.edu/.../ElecPwr_HSW.html.

[3] Y. Fukuyama, Y. Nakanishi, and H.-D. Chiang, **“Fast Distribution Power Flow Using Multi-Processors”**, Electrical Power & Energy Systems, Vol. 18, No. 5,1996, pp. 331-337.

[4] C.L.C. De Castro, A.B. Rodrigues, and M.G. Silva, **“Reliability Evaluation of Radial Distribution Systems Considering Voltage Drop Constraints in the Restoration Process”**, 8th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Iowa State University, Ames, Iowa, September 12-16, 2004, pp. 106-111.

[5] บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ , **“การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังเบื้องต้น”**, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547,หน้า 23-38.

[6] ธวัช สิริสังกาส, **“การหาตำแหน่งและขนาดติดตั้งคาปาซิเตอร์แบงค์ที่เหมาะสมเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าพร้อมทั้งคำนึงถึงความไม่เป็นเชิงเส้นของโหลดโดยใช้วิธีกลุ่ม อนุภาค”**, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2550.

[7] ยุทธนา เอี่ยมสมบูรณ์, **“การหาตำแหน่งและขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายที่เหมาะสม เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและเพิ่มความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายโดยวิธีค้นหาแบบตาบู”**,วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2550.

[8] กนกวรรณ กลิ่นเอี่ยม, **“การหาตำแหน่งการติดตั้งสวิตซ์ตัดตอนที่เหมาะสม ในระบบจำหน่ายแบบเรเดียลโดยวิธีเชิงพันธุกรรม”**, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2549.

[9] Hiroyuki Mori, and Hidenobu Tani, “**Two-Staged Tabu Search for Determining Optimal Allocation of D-FACTS in Radial Distribution Systems with Distributed Generation**”, Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia Pacific. IEEE/PES, October 2002, pp. 56-61.

[10] Ping Yan, and Arun Sekar, “**Analysis of Radial Distribution Systems With Embedded Series FACTS Devices Using a Fast Line Flow-Based Algorithm**”, IEEE Transactions on Power Systems, November 2005, pp. 1775-1782.

[11] บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ , **"การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังเบื้องต้น"**, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547,หน้า 23-38.

[12] P. Kundur, **"Power System Stability and Control",** Chapter 14 Voltage Stability, New York:McGraw-Hill, 1994. pp. 959-1022.

[13] P. Kundur, **"Power System Stability and Control",** Chapter 2 Introduction to the Power System Stability Problem, New York:McGraw-Hill, 1994. pp. 17-41.

[14] ธวัช เกิดชื่น และ กฤตวิทย์ บัวใหญ่, "**เทคนิคการคำนวณการไหลของกำลังในระบบจำหน่าย**", การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล (EENET2008), คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2552, หน้า 1-13.

[15] อุเทน ลีตน และ ธนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์, **"การแก้ปัญหากำลังงานสูญเสียในสายส่งต่ำที่สุดโดยใช้ผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุดที่อาศัยปัญญาเชิงกลุ่ม"**, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33, ธันวาคม 2553,หน้า 81-84.

[16] A. P. Engelbrecht, "**Fundamentals of Computational Swarm Intelligence",** West Sussex: John Wiley & Sons, 2005.

[17] J. Kennedy, and R. Eberhart, "**Particle Swarm Optimization**", Proceeding of the IEEE International Conferrence on Neural Network. Perth : Piscataway, 1995.

[18] Claudio A. Canizares, **"Power Flow and Transient Stability Models of FACTS Controllers for Voltage and Angle Stability Studies"**, IEEE Transactions on Power Systems, January 2000, pp. 1-8.

[19] Halas Bilge Mutluer, **"Design Implementation and Engineering Aspects of For Industrial SVC Systems",** Thesis Submitted to The Degree of Doctor of Philosophy in Electrical and Electronics Engineering of Middle East Technical University ,March 2008**.**

[20] Claudio A. Canizares, Massimo Pozzib, Sandro Corsib, and Edvina Uzunovic, **"Review STATCOM modeling for voltage and angle stability studies"**, International Journal of Electrical Power & Energy Systems Volume 25, Issue 6, July 2003, pp. 431-441.

[21] ABB, "**STATCOM solutions for Wind Farms"**, www.abb.com/powerelectronics Available:http://www05.abb.com/global/scot/scot232.nsf/veritydisplay/9cc1328c6b8e19f9c12576c50030add6 (1 February 2011).

[22] IEEE , **IEEE Standard 33-Bus Radial Distribution Systems (Online)**, Available: http://www.ieee.org, IEEE Standard 33-Bus Radial Distribution System (11September 2010).

ภาคผนวก ก

ก.1 ข้อมูลสาขาต่าง ๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE

ก.2 ข้อมูลบัสต่าง ๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE

ภาคผนวก ก.1
ข้อมูลบัสต่าง ๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลบัสต่าง ๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE

From Bus	To Bus	R (p.u.)	X (p.u.)	B (p.u.)	Rating (MVA)
1	2	0.0058	0.0030	0	10
2	3	0.0102	0.0098	0	10
3	4	0.0308	0.0157	0	10
4	5	0.0939	0.0846	0	10
5	6	0.0228	0.0116	0	10
6	7	0.0282	0.0192	0	10
7	8	0.0255	0.0298	0	10
8	9	0.0238	0.0121	0	10
9	10	0.0560	0.0442	0	10
10	11	0.0442	0.0585	0	10
11	12	0.0511	0.0441	0	10
12	13	0.0559	0.0437	0	10
13	14	0.0127	0.0065	0	10
14	15	0.0117	0.0386	0	10
15	16	0.0177	0.0090	0	10
16	17	0.1068	0.0771	0	10
17	18	0.0661	0.0583	0	10
18	19	0.0643	0.0462	0	10
19	20	0.0502	0.0437	0	10
20	21	0.0649	0.0462	0	10
21	22	0.0317	0.0161	0	10
22	23	0.0123	0.0041	0	10
23	24	0.0608	0.0601	0	10
24	25	0.0234	0.0077	0	10
25	26	0.0194	0.0226	0	10

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลบัสต่าง ๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE (ต่อ)

From Bus	To Bus	R (p.u.)	X (p.u.)	B (p.u.)	Rating (MVA)
26	27	0.0916	0.0721	0	10
27	28	0.0213	0.0331	0	10
28	29	0.0338	0.0445	0	10
29	30	0.0369	0.0328	0	10
30	31	0.0466	0.0340	0	10
31	32	0.0804	0.1074	0	10
32	33	0.0457	0.0358	0	10

ภาคผนวก ก.2
ข้อมูลบัสต่าง ๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลบัสต่าง ๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE

Bus No	Type	Pload	Qload	Gs p.u.	Bs p.u.	Area	Vm	Va	Base kV	Area
1	3	0.000	0.000	0	0	1	1	0	12.66	1
2	1	0.100	0.060	0	0	1	1	0	12.66	1
3	1	0.090	0.040	0	0	1	1	0	12.66	1
4	1	0.090	0.040	0	0	1	1	0	12.66	1
5	1	0.090	0.040	0	0	1	1	0	12.66	1
6	1	0.120	0.080	0	0	1	1	0	12.66	1
7	1	0.090	0.050	0	0	1	1	0	12.66	1
8	1	0.090	0.040	0	0	1	1	0	12.66	1
9	1	0.060	0.030	0	0	1	1	0	12.66	1
10	1	0.420	0.200	0	0	1	1	0	12.66	1
11	1	0.090	0.040	0	0	1	1	0	12.66	1
12	1	0.060	0.020	0	0	1	1	0	12.66	1
13	1	0.420	0.200	0	0	1	1	0	12.66	1

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลบัสต่าง ๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE (ต่อ)

Bus No	Type	Pload	Qload	Gs p.u.	Bs p.u.	Area	Vm	Va	Base kV	Area
14	1	0.060	0.025	0	0	1	1	0	12.66	1
15	1	0.200	0.100	0	0	1	1	0	12.66	1
16	1	0.060	0.025	0	0	1	1	0	12.66	1
17	1	0.200	0.100	0	0	1	1	0	12.66	1
18	1	0.060	0.020	0	0	1	1	0	12.66	1
19	1	0.060	0.020	0	0	1	1	0	12.66	1
20	1	0.120	0.070	0	0	1	1	0	12.66	1
21	1	0.060	0.020	0	0	1	1	0	12.66	1
22	1	0.200	0.600	0	0	1	1	0	12.66	1
23	1	0.045	0.030	0	0	1	1	0	12.66	1
24	1	0.150	0.070	0	0	1	1	0	12.66	1
25	1	0.060	0.035	0	0	1	1	0	12.66	1
26	1	0.210	0.100	0	0	1	1	0	12.66	1
27	1	0.060	0.035	0	0	1	1	0	12.66	1
28	1	0.060	0.040	0	0	1	1	0	12.66	1
29	1	0.120	0.080	0	0	1	1	0	12.66	1
30	1	0.060	0.010	0	0	1	1	0	12.66	1
31	1	0.060	0.020	0	0	1	1	0	12.66	1
32	1	0.060	0.020	0	0	1	1	0	12.66	1
33	1	0.090	0.040	0	0	1	1	0	12.66	1

ภาคผนวก ข

ข.1 โปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วย MATLAB M-File

ข.2 โปรแกรมการหาตำแหน่งติดตั้ง SVC ที่เหมาะสมโดยใช้ PSO

ข.3 โปรแกรมการหาตำแหน่งติดตั้ง STATCOM ที่เหมาะสมโดยใช้ PSO

ภาคผนวก ข.1

โปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วย MATLAB M-File

<u>ข้อมูลบัส</u>

```
% input33.m
%% system MVA base
clear
clc
% base MVA = 10 MVA;
baseMVA = 10;
% Base kV = 12.66 kV;
baseKV=12.66;
%% bus data
bus = [
%bus_i type Pd      Qd      Gs  Bs  area Vm  Va  baseKV zone Vmax    Vmin
% ==== === =====   =====   === === === === ===  ====== ==== ====    ======
     1  3   0       0       0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     2  1   0.1     0.06    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     3  1   0.09    0.04    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     4  1   0.09    0.04    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     5  1   0.09    0.04    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     6  1   0.12    0.08    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     7  1   0.09    0.05    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     8  1   0.09    0.04    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     9  1   0.06    0.03    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     10 1   0.42    0.2     0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     11 1   0.09    0.04    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     12 1   0.06    0.02    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     13 1   0.42    0.2     0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     14 1   0.06    0.025   0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     15 1   0.2     0.1     0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     16 1   0.06    0.025   0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     17 1   0.2     0.1     0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     18 1   0.06    0.02    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     19 1   0.06    0.02    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     20 1   0.12    0.07    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     21 1   0.06    0.02    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     22 1   0.2     0.6     0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     23 1   0.045   0.030   0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     24 1   0.15    0.07    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     25 1   0.06    0.035   0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     26 1   0.21    0.1     0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     27 1   0.06    0.035   0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     28 1   0.06    0.04    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     29 1   0.12    0.08    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     30 1   0.06    0.01    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     31 1   0.06    0.02    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     32 1   0.06    0.02    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     33 1   0.09    0.04    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
%    ====================================================================
];

%% generator data
gen = [
 %  bus  Pg  Qg  Qmax Qmin  Vg   mBase   status  Pmax   Pmin
 %  ===  === === ===  ===   ===  ====    =====   ====   ====
     1   0    0   10  -10   1.05  10       1     10      0;
 %  ========================================================
];
```

....

ข้อมูลสาขา

```
%% Branch data
branch = [
% fbus  tbus  r         x       b   rateA rateB rateC ratio angle  status
% ====  ====  ===       ===     === ===== ===== ===== ===== =====  ======
  1     2     0.0058    0.0030  0   10    10    10      0     0       1;
  2     3     0.0102    0.0098  0   10    10    10      0     0       1;
  2     4     0.0308    0.0157  0   10    10    10      0     0       1;
  3     5     0.0939    0.0846  0   10    10    10      0     0       1;
  4     6     0.0228    0.0116  0   10    10    10      0     0       1;
  4     7     0.0282    0.0192  0   10    10    10      0     0       1;
  5     8     0.0255    0.0298  0   10    10    10      0     0       1;
  6     9     0.0238    0.0121  0   10    10    10      0     0       1;
  7     10    0.0560    0.0442  0   10    10    10      0     0       1;
  8     11    0.0442    0.0585  0   10    10    10      0     0       1;
  9     12    0.0511    0.0441  0   10    10    10      0     0       1;
  10    13    0.0559    0.0437  0   10    10    10      0     0       1;
  12    14    0.0127    0.0065  0   10    10    10      0     0       1;
  12    15    0.0117    0.0386  0   10    10    10      0     0       1;
  14    16    0.0177    0.0090  0   10    10    10      0     0       1;
  15    17    0.1068    0.0771  0   10    10    10      0     0       1;
  16    18    0.0661    0.0583  0   10    10    10      0     0       1;
  17    19    0.0643    0.0462  0   10    10    10      0     0       1;
  18    20    0.0502    0.0437  0   10    10    10      0     0       1;
  19    21    0.0649    0.0462  0   10    10    10      0     0       1;
  20    22    0.0317    0.0161  0   10    10    10      0     0       1;
  21    23    0.0123    0.0041  0   10    10    10      0     0       1;
  22    24    0.0608    0.0601  0   10    10    10      0     0       1;
  23    25    0.0234    0.0077  0   10    10    10      0     0       1;
  24    26    0.0194    0.0226  0   10    10    10      0     0       1;
  25    27    0.0916    0.0721  0   10    10    10      0     0       1;
  26    28    0.0213    0.0331  0   10    10    10      0     0       1;
  27    29    0.0338    0.0445  0   10    10    10      0     0       1;
  29    30    0.0369    0.0328  0   10    10    10      0     0       1;
  30    31    0.0466    0.0340  0   10    10    10      0     0       1;
  31    32    0.0804    0.1074  0   10    10    10      0     0       1;
  32    33    0.0457    0.0358  0   10    10    10      0     0       1;
% ==========================================================================
];
%%-----  OPF Data  -----%%
%% area data
areas = [
    1   1;
];
%% generator cost data
%   1   startup shutdown    n   x0  y0  ... xn  yn
%   2   startup shutdown    n   c(n-1)  ... c0
gencost = [
    2   0   0   3   0   10  0;
];
return;
```

....

คำนวณหา Zbus

```
% Zbus.m
function[zbus]=Zbus(branch)
% This function calculates the Bus impedance matrix of radial system
FN=branch(:,1);
TN=branch(:,2);
```

```
R=branch(:,3);
X=branch(:,4);
B=branch(:,5);
n=length(R);
Z=n+1;
zbus=zeros(Z,Z);
zbus(1,1)=0+j*0.000000001;
% j=sqrt(-1);
for i=1:n
    a=FN(i);
    b=TN(i);
    zbus(b,:)=zbus(a,:);
    zbus(:,b)=zbus(:,a);
    zbus(b,b)=zbus(a,a)+R(i)+j*X(i);
end
```

ฟังก์ชันโหลดโฟลว์

```
% DLF.m
function
[V,I,itt,maxmis]=DLF(bustype,Pg,Qg,Pl,Ql,FN,TN,R,X,B,baseMVA,Vset)

% This function finds the load flow solution of distribution system
with
% one root node and other load buses in the system
N=length(bustype);      % N is the number of nodes
n=N-1;                  % n is the number of sections
j=sqrt(-1);
V=ones(N,1)+j*zeros(N,1);% Flat start
for i=1:N
    if bustype(i)==3
        V(i)=Vset;      % Setting the value of voltages of 0.98 for
Generator bus
    end
end
maxmis=0.0001;          % Maximum mismatch
maxitt=100;             % Maximum iteration
itt=0;          %initial of iteration
dVmax=1;        %initial of dV
```

การคำนวณ Backward/Forward Sweep

```
%%%%%%%%% Iteration Start %%%%%%%%%

while itt<maxitt & dVmax>maxmis
    itt=itt+1;
    % Calculating Nodal Current
    for i=1:N;
        Pi(i)=(Pl(i)-Pg(i));
        Qi(i)=(Ql(i)-Qg(i));
        In(i,:)=(Pi(i)-j*Qi(i))/(conj(V(i)));  % In is the load
current
    end
    for i=2:N;
        I(i-1)=In(i);
    end
```

```
%BACKWARD SWEEP
Vk=V;
for i=1:n;
    a=N-i;
    for b=1:n;
        if FN(b)==a+1
            c=TN(b);
            I(a)=I(a)+I(c-1)+j*B(c-1)*V(a+1);
        end
    end
    I(a)=I(a)+j*V(a+1)*B(a)/2;  %I is the branch current
end

% FORWARD SWEEP
for i=1:n;
    k=FN(i);
    V(i+1)=V(k)-(R(i)+j*X(i))*I(i);
    dV(i)=abs(V(i+1)-Vk(i+1));
end
dVmax=max(dV);
end
```

………

<u>คำนวณโหลดโฟลว์</u>

```
% Basecase_33.m
%% DISTRIBUTION LOAD FLOW %%
%% system MVA base and kV base
clear
clc
input33;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
tic;
BN= bus(:,1);
bustype=bus(:,2);
Pl=bus(:,3)/baseMVA;
Ql=bus(:,4)/baseMVA;
Qsh=bus(:,6)/baseMVA;
FN = branch(:,1);
TN = branch(:,2);
R = branch(:,3);
X = branch(:,4);
B = branch(:,5);
N=length(bustype);
Pg=zeros(N,1);
Qg=zeros(N,1);
Vset=0.98;
%--------------------------------------------------------------
zbus=Zbus(branch);
Rik=real(zbus);         %finding R bus
Xik=imag(zbus);         %finding X bus
%--------------------------------------------------------------
%%%%%-------------------Voltage Bus--------------------%%%%%
% setting the value of voltage of 0.98 for Generator bus
[V I itt maxmis]=DLF(bustype,Pg,Qg,Pl,Ql,FN,TN,R,X,B,baseMVA,Vset);
%--------------------------------------------------------------
toc;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

คำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียแรกเริ่ม

```
%%%%% Finding the Original Loss %%%%%%%%%%
for gg=1:N
    Pi(gg)=(Pg(gg)-Pl(gg));
    Qi(gg)=(Qg(gg)-Ql(gg));
end

Vm=abs(V);                  %*basekV;
Delta=angle(V);
for k=1:N
    for l=1:N
    alpha(k,l)=Rik(k,l)*cos(Delta(k)-Delta(l))/(Vm(k)*Vm(l));
    beta(k,l)=Rik(k,l)*sin(Delta(k)-Delta(l))/(Vm(k)*Vm(l));
    gama(k,l)=Xik(k,l)*cos(Delta(k)-Delta(l))/(Vm(k)*Vm(l));
    geta(k,l)=Xik(k,l)*sin(Delta(k)-Delta(l))/(Vm(k)*Vm(l));
    end
end
Plss=0;
Qlss=0;
for i=1:N
    for k=1:N

Plss=Plss+(alpha(i,k)*(Pi(i)*Pi(k)+Qi(i)*Qi(k))+beta(i,k)*(Qi(i)*Pi(k)-
Pi(i)*Qi(k)));    % appproximate loss calculation
        Qlss=Qlss+(gama(i,k)*(Pi(i)*Pi(k)+Qi(i)*Qi(k))+geta(i,k)*(Qi(i)*Pi(k)-
Pi(i)*Qi(k)));    % appproximate loss calculation
    end
end
PLossORG=Plss*baseMVA*1000;
QLossORG=Qlss*baseMVA*1000;
```

แสดงผลโหลดโฟลว์

```
%-------------------------------------------------------------------------
%                   Result Printing
%-------------------------------------------------------------------------
fprintf('\n')
fprintf('                     Line Flow and Losses \n')
fprintf('  ------------------------------------------------------------------------
----------\n');
fprintf('     --Line--        --- From bus injection ---   --- To bus
injection ---        --- Loss (I^2*Z)  ---\n')
fprintf('     from to --      P(kW)         Q (kVar)       P(kW)
Q(Var)          P(kW)       Q(kVar)  \n')
fprintf('  ------------------------------------------------------------------------
----------\n');
% Calculate exact loss
Loss=0;
line_loss=zeros(N-1,1);
for i=1:N-1
    z(i)=R(i)+j*X(i);
    a=FN(i);                        %from node
    b=TN(i);                        %to node
    Iff(i)=(V(a)-V(b))/z(i);        %Ct at starting bus
    It(i)=(V(b)-V(a))/z(i);         %Ct at ending bus
    Lff(i)=V(a)*conj(Iff(i));      %Line flow at the starting bus
    Lft(i)=V(b)*conj(It(i));       %Line flow at the end bus
    line_loss(i)=Lff(i)+Lft(i);     %Line loss of a branch
    Loss=Loss+line_loss(i);
    fprintf('%6g',FN(i)),fprintf('%6g',TN(i)), fprintf('
%9.3f',real(Lff(i)*baseMVA)*1000),fprintf('
%9.3f',imag(Lff(i)*baseMVA)*1000);
```

```
    fprintf('     %9.3f',real(Lft(i)*baseMVA)*1000),fprintf('
%9.3f',imag(Lft(i)*baseMVA)*1000);
    fprintf('     %9.3f',real(line_loss(i)*baseMVA)*1000),fprintf('
%9.3f',imag(line_loss(i)*baseMVA)*1000);
    fprintf('\t\t \n');

end
Tlos=Loss*baseMVA*1000;     %Total loss
real_loss=real(Tlos);
reactive_loss=imag(Tlos);
%==============================================================================
=====
fprintf('  -------------------------------------------------------------------
----------\n');
fprintf('                 Total loss
'),
fprintf(' %9.3f',real_loss),fprintf(' %16.3f',reactive_loss);     %formular
%fprintf(' %9.3f',PlossORG),fprintf(' %16.3f',QlossORG);          %exact loss
fprintf(' \n');
fprintf('  -------------------------------------------------------------------
----------\n');

%%%% Print the power flow solution on the screen %%%%
Pdt = sum(Pl); Qdt = sum(Ql); Qsht = sum(Qsh);
Pg(1)=0; Qg(1)=0;
Pg(1)=(Pdt+real_loss/(1000*baseMVA));
Qg(1)=(Qdt+reactive_loss/(1000*baseMVA)-Qsht);
Pgt = sum(Pg); Qgt = sum(Qg);

fprintf('    \n');
%disp(tech)
fprintf('                     Maximum Power Mismatch = %g \n', maxmis)
fprintf('                            No. of Iterations = %g \n\n', itt)
fprintf('  -------------------------------------------------------------------
----------\n');
head = ['   Bus Voltage Angle -----Load-----   ---Generation---   Injected'
        '   No. Mag.    Degree       kW       kVar    kW       kVar      kVar '];
disp(head)
fprintf('  -------------------------------------------------------------------
----------\n');
for n=1:N
     fprintf(' %5g',n),fprintf(' %7.4f',Vm(n)),
     fprintf(' %8.3f',Delta(n)), fprintf('  %9.3f',Pl(n)*1000*baseMVA),
     fprintf(' %9.3f',Ql(n)*1000*baseMVA), fprintf('
%9.3f',Pg(n)*1000*baseMVA),
     fprintf(' %9.3f',Qg(n)*1000*baseMVA), fprintf('
%8.3f\n',Qsh(n)*1000*baseMVA)
end
fprintf('  -------------------------------------------------------------------
----------\n');
     fprintf('      Total       ')
     fprintf(' %9.3f',Pdt*1000*baseMVA), fprintf('  %9.3f',Qdt*1000*baseMVA),
     fprintf(' %9.3f',Pgt*1000*baseMVA), fprintf('  %9.3f',Qdt*1000*baseMVA),
fprintf(' %9.3f\n',Qsht*1000*baseMVA);
fprintf('  -------------------------------------------------------------------
----------\n');
```

....

ภาคผนวก ข.2
โปรแกรมการหาตำแหน่งติดตั้ง SVC ที่เหมาะสมโดยใช้ PSO

ข้อมูลบัส

```
% input33.m
%% system MVA base
clear
clc
% base MVA = 10 MVA;
baseMVA = 10;
% Base kV = 12.66 kV;
baseKV=12.66;
%% bus data
bus = [
%bus_i type Pd      Qd      Gs  Bs  area Vm  Va  baseKV zone Vmax    Vmin
% ==== === =====   =====   === === === === ===  ====== ==== ====    ======
     1  3   0       0       0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     2  1   0.1     0.06    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     3  1   0.09    0.04    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     4  1   0.09    0.04    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     5  1   0.09    0.04    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     6  1   0.12    0.08    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     7  1   0.09    0.05    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     8  1   0.09    0.04    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     9  1   0.06    0.03    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     10 1   0.42    0.2     0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     11 1   0.09    0.04    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     12 1   0.06    0.02    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     13 1   0.42    0.2     0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     14 1   0.06    0.025   0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     15 1   0.2     0.1     0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     16 1   0.06    0.025   0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     17 1   0.2     0.1     0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     18 1   0.06    0.02    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     19 1   0.06    0.02    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     20 1   0.12    0.07    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     21 1   0.06    0.02    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     22 1   0.2     0.6     0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     23 1   0.045   0.030   0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     24 1   0.15    0.07    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     25 1   0.06    0.035   0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     26 1   0.21    0.1     0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     27 1   0.06    0.035   0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     28 1   0.06    0.04    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     29 1   0.12    0.08    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     30 1   0.06    0.01    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     31 1   0.06    0.02    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     32 1   0.06    0.02    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     33 1   0.09    0.04    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
%    ====================================================================
];
```

ข้อมูลเจนเนอเรเตอร์

```
%% generator data
gen = [
 %  bus  Pg  Qg  Qmax Qmin  Vg   mBase   status  Pmax   Pmin
 %  ===  === === ===  ===   ===  ====    =====   ====   ====
     1   0    0   10  -10  1.05   10       1     10      0;
 %  ====================================================
];
```

ข้อมูลสาขา

```
%% Branch data
branch = [
% fbus  tbus  r         x       b   rateA rateB rateC ratio angle  status
% ====  ====  ===       ===     === ===== ===== ===== ===== =====  ======
  1     2     0.0058    0.0030  0   10    10    10      0     0       1;
  2     3     0.0102    0.0098  0   10    10    10      0     0       1;
  2     4     0.0308    0.0157  0   10    10    10      0     0       1;
  3     5     0.0939    0.0846  0   10    10    10      0     0       1;
  4     6     0.0228    0.0116  0   10    10    10      0     0       1;
  4     7     0.0282    0.0192  0   10    10    10      0     0       1;
  5     8     0.0255    0.0298  0   10    10    10      0     0       1;
  6     9     0.0238    0.0121  0   10    10    10      0     0       1;
  7     10    0.0560    0.0442  0   10    10    10      0     0       1;
  8     11    0.0442    0.0585  0   10    10    10      0     0       1;
  9     12    0.0511    0.0441  0   10    10    10      0     0       1;
  10    13    0.0559    0.0437  0   10    10    10      0     0       1;
  12    14    0.0127    0.0065  0   10    10    10      0     0       1;
  12    15    0.0117    0.0386  0   10    10    10      0     0       1;
  14    16    0.0177    0.0090  0   10    10    10      0     0       1;
  15    17    0.1068    0.0771  0   10    10    10      0     0       1;
  16    18    0.0661    0.0583  0   10    10    10      0     0       1;
  17    19    0.0643    0.0462  0   10    10    10      0     0       1;
  18    20    0.0502    0.0437  0   10    10    10      0     0       1;
  19    21    0.0649    0.0462  0   10    10    10      0     0       1;
  20    22    0.0317    0.0161  0   10    10    10      0     0       1;
  21    23    0.0123    0.0041  0   10    10    10      0     0       1;
  22    24    0.0608    0.0601  0   10    10    10      0     0       1;
  23    25    0.0234    0.0077  0   10    10    10      0     0       1;
  24    26    0.0194    0.0226  0   10    10    10      0     0       1;
  25    27    0.0916    0.0721  0   10    10    10      0     0       1;
  26    28    0.0213    0.0331  0   10    10    10      0     0       1;
  27    29    0.0338    0.0445  0   10    10    10      0     0       1;
  29    30    0.0369    0.0328  0   10    10    10      0     0       1;
  30    31    0.0466    0.0340  0   10    10    10      0     0       1;
  31    32    0.0804    0.1074  0   10    10    10      0     0       1;
  32    33    0.0457    0.0358  0   10    10    10      0     0       1;
% =========================================================================
];
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

bustype=bus(:,2);
N=length(bustype);      % N is the number of nodes
n=N-1;                  % n is the number of sections
j=sqrt(-1);
V=ones(N,1)+j*zeros(N,1);% Flat start
for aa=1:N
    if bustype(aa)==3
        V(aa)=0.98 ;     % Setting the value of voltages of 0.98 for Generator
bus
    end
end
maxmis=0.0001;          % Maximum mismatch
maxitt=100;             % Maximum iteration
itt=0;
dVmax=1;
Pl=bus(:,3)/baseMVA;
Ql=bus(:,4)/baseMVA;
FN=branch(:,1);
TN=branch(:,2);
R=branch(:,3);
X=branch(:,4);
B=branch(:,5);
Pg=zeros(N,1);
Qg=zeros(N,1);
```

คำนวณอิมพีแดนซ์

```
%  Calculated Impedance
Z=n+1;
zbus=zeros(Z,Z);
zbus(1,1)=0+j*0.000000001;

for bb=1:n
    a=FN(bb);
    b=TN(bb);
    zbus(b,:)=zbus(a,:);
    zbus(:,b)=zbus(:,a);
    zbus(b,b)=zbus(a,a)+R(bb)+j*X(bb);
end
Rik=real(zbus);     % Finding R bus
Xik=imag(zbus);     % Finding X bus
```

แรงดันบัส

```
%%%%%%%-----------------Voltage Bus----------------------%%%%%%%

while itt<maxitt&dVmax>maxmis
    itt=itt+1;
    % Calculating Nodal Current
    for cc=1:N;
        Pi(cc)=(Pl(cc)-Pg(cc));
        Qi(cc)=(Ql(cc)-Qg(cc));
        In(cc,:)=(Pi(cc)-j*Qi(cc))/(conj(V(cc)));  % In is the load current
    end
    for cc=2:N;
        I(cc-1)=In(cc);
    end

%BACKWARD SWEEP
Vk=V;
for dd=1:n;
    a=N-dd;
    for b=1:n;
        if FN(b)==a+1
            c=TN(b);
            I(a)=I(a)+I(c-1)+j*B(c-1)*V(a+1);
        end
    end
    I(a)=I(a)+j*V(a+1)*B(a)/2;  %I is the branch current
end

% FORWARD SWEEP
for ee=1:n;
    ff=FN(ee);
    V(ee+1)=V(ff)-(R(ee)+j*X(ee))*I(ee);
    dV(ee)=abs(V(ee+1)-Vk(ee+1));
end
dVmax=max(dV);
end

for gg=1:N
    Pi(gg)=(Pg(gg)-Pl(gg));
    Qi(gg)=(Qg(gg)-Ql(gg));
end
Vm=abs(V);%*baseKV;
Delta=angle(V);
for hh=1:N
    for ii=1:N
    alpha(hh,ii)=Rik(hh,ii)*cos(Delta(hh)-Delta(ii))/(Vm(hh)*Vm(ii));
```

```
    beta(hh,ii)=Rik(hh,ii)*sin(Delta(hh)-Delta(ii))/(Vm(hh)*Vm(ii));
    gama(hh,ii)=Xik(hh,ii)*cos(Delta(hh)-Delta(ii))/(Vm(hh)*Vm(ii));
    geta(hh,ii)=Xik(hh,ii)*sin(Delta(hh)-Delta(ii))/(Vm(hh)*Vm(ii));
    end
end
```

<u>ขีดจำกัดตำแหน่งและขนาดของ SVC</u>

```
LL1=2; %limit of min location
LH1=33;%limit of max location
LL2=2; %limit of min location
LH2=33;%limit of max location
LL3=2; %limit of min location
LH3=33;%limit of max location
SL1=-10;%limit of min size SVC
SH1=10; %limit of max size SVC
SL2=-10;%limit of min size SVC
SH2=10; %limit of max size SVC
SL3=-10;%limit of min size SVC
SH3=10; %limit of max size SVC
```

………

<u>คำนวณหา Zbus</u>

```
% Zbus.m
function[zbus]=Zbus(branch)
% This function calculates the Bus impedance matrix of radial system
FN=branch(:,1);
TN=branch(:,2);
R=branch(:,3);
X=branch(:,4);
B=branch(:,5);
n=length(R);
Z=n+1;
zbus=zeros(Z,Z);
zbus(1,1)=0+j*0.000000001;
% j=sqrt(-1);
for i=1:n
    a=FN(i);
    b=TN(i);
    zbus(b,:)=zbus(a,:);
    zbus(:,b)=zbus(:,a);
    zbus(b,b)=zbus(a,a)+R(i)+j*X(i);
end
```

………

<u>ฟังก์ชันโหลดโฟลว์</u>

```
% DLF.m
function [V,I]=DLF(bustype,Pg,Qg,Pl,Ql,FN,TN,R,X,B,baseMVA)

% This function finds the load flow solution of distribution system with
% one root node and other load buses in the system
N=length(bustype);      % N is the number of nodes
n=N-1;                  % n is the number of sections
j=sqrt(-1);
```

```
V=ones(N,1)+j*zeros(N,1);% Flat start
for i=1:N
    if bustype(i)==3
        V(i)=0.98;      % Setting the value of voltages of 0.98 for Generator
bus
    end
end
maxmis=0.0001;          % Maximum mismatch
maxitt=100;             % Maximum iteration
itt=0;
dVmax=1;
```

การคำนวณ Backward/Forward Sweep

```
% Iteration Start

while itt<maxitt&dVmax>maxmis
    itt=itt+1;
    % Calculating Nodal Current
    for i=1:N;
        Pi(i)=(Pl(i)-Pg(i));
        Qi(i)=(Ql(i)-Qg(i));
        In(i,:)=(Pi(i)-j*Qi(i))/(conj(V(i)));  % In is the load current
    end
    for i=2:N;
        I(i-1)=In(i);
    end

%BACKWARD SWEEP
Vk=V;
for i=1:n;
    a=N-i;
    for b=1:n;
        if FN(b)==a+1
            c=TN(b);
            I(a)=I(a)+I(c-1)+j*B(c-1)*V(a+1);
        end
    end
    I(a)=I(a)+j*V(a+1)*B(a)/2;  %I is the branch current
end

% FORWARD SWEEP
for i=1:n;
    k=FN(i);
    V(i+1)=V(k)-(R(i)+j*X(i))*I(i);
    dV(i)=abs(V(i+1)-Vk(i+1));
end
dVmax=max(dV);
end
```

....

ฟังก์ชันโหลดโฟลว์

```
% DLFVS.m
function [V,Iq,Im]=DLFVS(m,bustype,Pg,Qg,Pl,Ql,FN,TN,R,X,B,baseMVA)

% This function finds the load flow solution of the distribution system

N=length(bustype);      % N is the number of nodes
n=N-1;                  % n is the number of sections
j=sqrt(-1);
```

```
V=ones(N,1)+j*zeros(N,1); % Flast start
for i=1:N
    if bustype(i)==3
        V(i)=0.98;      % Setting the value of voltages of 0.98 for Generator
bus
    end
end
maxmis=0.0001;          % Maximum mismatch
maxitt=100;             % Maximum iteration
itt=0;
dVmax=1;
```

<u>การคำนวณ Backward/Forward Sweep</u>

```
% Iteration Start
while itt<maxitt&dVmax>maxmis
    itt=itt+1;
    % Calculating Nodal Current
    for i=1:N;
        Pi(i)=(Pl(i)-Pg(i));
        Qi(i)=(Ql(i)-Qg(i));
        In(i)=(Pi(i)-j*Qi(i))/(conj(V(i))); % In is the load current
    end
    for i=2:N;
        I(i-1)=In(i);
    end

    % BACKWARD SWEEP
    Vk=V;
    for i=1:n
        a=N-i;
        for b=1:n;
            if FN(b)==a+1
                c=TN(b);
                I(a)=I(a)+I(c-1)+j*B(c-1)*V(a+1);
            end
        end
        I(a)=I(a)+j*V(a+1)*B(a)/2;  % I is the branch current
    end
    for i=1:n
        Jp(i+1)=real(I(i));         % Real part of the branch Current
        Jq(i+1)=imag(I(i));         % Imaginary part of the branch Current
    End
```

<u>การเรียกกระแสมาเพื่อหาแรงดันบัส</u>

```
    % Finding the requied reactive current to support bus voltage
    AA=0;
    BB=0;
    RR=0;
    XX=0;
    aa=m;
    for i=n:-1:1;
        if TN(i)==aa;
            AA=AA+(R(i)*Jp(aa)-X(i)*Jq(aa));
            BB=BB+(X(i)*Jp(aa)-R(i)*Jq(aa));
            RR=RR+R(i);
            XX=XX+X(i);
            aa=FN(i);
        end
    end
    Eqn1=RR^2+XX^2;
    Eqn2=2*((0.98-AA)*XX+(BB-0)*RR);
    Eqn3=(0.98-AA)^2+(BB-0)^2-0.98^2;
```

```
    Eqn=[Eqn1 Eqn2 Eqn3];
    Roots=roots(Eqn);
    for i=1:2
        if abs(Roots(i))<1;
            Iq=Roots(i);    % The required reactive current to support bus 
voltage
            break
        end
    end
    aa=m;
    for i=n:-1:1;
        if TN(i)==aa
            Jq(aa)=Jq(aa)+Iq;   % Updating the value of reactive current 
upstream
            aa=FN(i);
        end
    end
    j=sqrt(-1);
    for i=1:n;
        Im(i)=Jp(i+1)+j*Jq(i+1);    % Updating the value of branch current
    end

    % FORWARD SWEEP
    for i=1:n;
        k=FN(i);
        V(i+1)=V(k)-(R(i)+j*X(i))*Im(i);
        dV(i)=abs(V(i+1)-Vk(i+1));
    end
    dVmax=max(dV);
end
```

……

<u>การหาตำแหน่งเหมาะสมโดยใช้ PSO</u>

```
% Particle Swarm Optimization%
% TestPSO.m
clear
clc
input33;
%  input33;
% Finding Optimal Size of the SVC When SVC supply Real Power Only
Rik=real(zbus);                             % finding R bus
Xik=imag(zbus);                             % finding Xbus
for i=1:N
    Pi(i)=(Pg(i)-Pl(i));
    Qi(i)=(Qg(i)-Ql(i));
end
Vm=abs(V);
Delta=angle(V);
for i=1:N
    for k=1:N
        alpha(i,k)=Rik(i,k)*cos(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
        beta(i,k)=Rik(i,k)*sin(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
        gama(i,k)=Xik(i,k)*cos(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
        geta(i,k)=Xik(i,k)*sin(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
    end
end


Vm=abs(V);%*baseKV;
Delta=angle(V);
        XC=1.1708;
        XL=0.4925;
        alphaSVC=90*pi/180;
```

```
for alphaSVC=90*pi/180;
            Be=(2*alphaSVC-sin(2*alphaSVC)-pi*(2-XL/XC))/pi*XL;
            ISVC=V(aa)*Be;
            Q=V(aa)^2*Be;
end

for hh=1:N
    for ii=1:N
    alpha(hh,ii)=Rik(hh,ii)*alphaSVC;
    beta(hh,ii)=Rik(hh,ii)*sin(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
    gama(hh,ii)=Xik(hh,ii)*cos(Delta(hh)-Delta(ii))/(Vm(hh)*Vm(ii));
    geta(hh,ii)=Xik(hh,ii)*sin(Delta(hh)-Delta(ii))/(Vm(hh)*Vm(ii));
    end
end
```

เริ่มหาตำแหน่งที่เหมาะสมโดยใช้ PSO

```
% Start Particle Swarm Optimization
% ================================

H=[];
for gg=1:100
NG = 2;
population = 30;
generation = 50;
W = 1;
W_MAX = 0.9; W_MIN = 0.4;
C1 = 2; C2 = 2;
PL = zeros(1,population);
Pbest=1;
bestG=1;
```

ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้า

```
% Limit Power Generation
% =====================
for oo = 1:population
    PG_MIN(1,oo) = -10;
    PG_MIN(2,oo) = 10;
    PG_MAX(1,oo) = 1;
    PG_MAX(2,oo) =33;
end

velocity = 0.5*PG_MAX;
```

สุ่ม P,Q และตำแหน่งติดตั้ง

```
% Random for P,Q-gen and location
% ==============================

RAND_PGL = rand(NG,population);
PGL = RAND_PGL.*PG_MAX;
Pii=Pi;

%-------------------- MAIN Generation Loop -----------------------------%
%======================================================================%

for zz = 1:generation

% Finding the Loss by generate
```

```
% PGL(2,:)=round(rand(1,population).*PG_MAX(2,:));
PGL(2,:)=round(PGL(2,:));
        for mm=1:population
            for m=2:N
                if PGL(2,mm)==m
               Pii(m)=Pi(m)+PGL(1,mm);
                end
            end
            if (PGL(2,mm)>1)& (PGL(2,mm)<70)&(PGL(1,mm)<sum(Pl))
                for jj=1:N
                    for kk=1:N

        PL(mm)=PL(mm)+(alpha(jj,kk)*(Pii(jj)*Pii(kk)+Qi(jj)*Qi(kk))...
                     +beta(jj,kk)*(Qi(jj)*Pii(kk)-Pii(jj)*Qi(kk)));
                    end
                end
            else
        PL(mm)=10;
            end

        Pii=Pi;
        end

  PL=(PL-min(PL))/(max(PL)-min(PL));
```

เซ็ตค่า Pbest, Gbest

```
% Set Pbest, Gbest
% ================
    bestP = min(PL);
    bestG = min(bestP,bestG);

    for uu = 1:population
        if PL(1,uu)==bestP
        Pbest = PGL(:,uu);
        end
        if PL(1,uu)==bestG
        Gbest = PGL(:,uu);
        end
    end
```

อัพเดท PG

```
 % Update PG
 % =========
   W = ((W_MAX-W_MIN)*zz)/generation;
%     W = (W_MIN*zz)/generation
%     W=W_MAX-(((W_MAX-W_MIN)/generation)*zz)
%     W=W_MIN +(((W_MAX-W_MIN)/generation)*zz)
   for p = 1:population
       velocity(:,p) = W*velocity(:,p) + C1*rand(1)*(Pbest-
PGL(:,p))+C2*rand(1)*(Gbest-PGL(:,p));

%        for r = 1:NG
%            if velocity(r,p) > 0.5*PG_MAX(r,1)
%               velocity(r,p) = 0.5*PG_MAX(r,1);
%
%           elseif velocity(r,p) < -0.5*PG_MIN(r,1)
%               velocity(r,p) = -0.5*PG_MIN(r,1);
%            end
%        end

       PGL(:,p) = PGL(:,p) + velocity(:,p);
```

```
        end

   EVbest(zz,1) = bestP;
   EVbest(zz,2) = bestG;
   PPbest(:,zz)=Pbest;
   GGbest(:,zz)=Gbest;
end
% =========================================================================%
% ---------------------------End Main Loop-----------------------------%
H(:,gg)=Gbest;
end
% calLoss_Real
No_real
mean(result(:,3))
% EVbest
% [PPbest',GGbest']
```

………

<u>แสดงผลขนาดและตำแหน่งของ SVC</u>

```
%-------------------- Result of size and location of SVC ----------------%
% No_real.m
% Finding Optimal Size of the SVC When SVC supply Real Power Only
Rik=real(zbus);                              % finding R bus
Xik=imag(zbus);                              % finding Xbus
for i=1:N
    Pi(i)=(Pg(i)-Pl(i));
    Qi(i)=(Qg(i)-Ql(i));
end
Vm=abs(V);
Delta=angle(V);
for i=1:N
    for k=1:N
        alpha(i,k)=Rik(i,k)*cos(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
        beta(i,k)=Rik(i,k)*sin(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
        gama(i,k)=Xik(i,k)*cos(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
        geta(i,k)=Xik(i,k)*sin(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
    end
end
```

<u>คำนวณหากำลังไฟฟ้าสูญเสียแรกเริ่ม</u>

```
% Finding the Original Loss
Plss=0;
Qlss=0;
for i=1:N
    for k=1:N
% approximate loss calculation
 Plss=Plss+(alpha(i,k)*(Pi(i)*Pi(k)+Qi(i)*Qi(k))+beta(i,k)*(Qi(i)*Pi(k)-
Pi(i)*Qi(k)));
% approximate loss calculation
 Qlss=Qlss+(gama(i,k)*(Pi(i)*Pi(k)+Qi(i)*Qi(k))+geta(i,k)*(Qi(i)*Pi(k)-
Pi(i)*Qi(k)));
    end
end
for i=1:N
    sum=0;
    for k=1:N
        if k~=i
            sum=sum+(alpha(i,k)*Pi(k)-beta(i,k)*Qi(k));
        end
    end
```

```
% PSVC is the optimal size of the SVC to be placed at node i.
    PSVC(i)=Pl(i) - sum/alpha(i,i);
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%Iteration for finding the size of SVC for each bus when SVC supports Voltage
for m=2:N
    dDPG=1;
    dDPGmin=0.0001;
    while dDPG>dDPGmin
        SVC=PSVC(m);
        Pg(m)=PSVC(m)+Pg(m);
```

<u>รันโหลดโฟลว์</u>

```
% running the Distribution Load Flow with Voltage Support
%m is the bus where SVC with voltage support is to be installed
 [V,Iq]=DLFVS(m,bustype,Pg,Qg,Pl,Ql,FN,TN,R,X,B,baseMVA);
        Vm=abs(V);
        Delta=angle(V);
        XC=1.1708;
        XL=0.4925;
        alphaSVC=90*pi/180;
for alphaSVC=90*pi/180;
            Be=(2*alphaSVC-sin(2*alphaSVC)-pi*(2-XL/XC))/pi*XL;
            ISVC=V(aa)*Be;
            Q=V(aa)^2*Be;
end
```

<u>อัพเดทมุม Alpha, Beta, Gama และ Geta</u>

```
        %Updating the value of alpha, beta, gama and geta
        for i=1:N
            for k=1:N
                alpha(i,k)=Rik(i,k)*alphaSVC;
                beta(i,k)=Rik(i,k)*sin(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
                gama(i,k)=Xik(i,k)*cos(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
                geta(i,k)=Xik(i,k)*sin(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
            end
        end
```

<u>อัพเดทกำลังไฟฟ้าจริงของ SVC</u>

```
       %Updating the Real Power supplied by SVC
        for i=1:N
            Pi(i)=(Pg(i)-Pl(i));
            Qi(i)=(Qg(i)-Ql(i));
        end
        sum=0;
        for k=1:N
            if k~=m
                sum=sum+(alpha(m,k)*Pi(k)-beta(m,k)*Qi(k));
            end
        end
        PSVC(m)=Pl(m) - sum/alpha(m,m);  % PSVC is the optimal SVC size to be
placed at node i.
        dDPG=abs(PSVC(m)-SVC);
        Pg(m)=Pg(m)-SVC;
        Vp(m)=real(V(m));
        Vq(m)=imag(V(m));
        Iqq(m)=Iq;
    end
end
```

หากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟและเพาเวอร์แฟคเตอร์ของ SVC

```
 % Finding the reactive power of SVC and SVC power factor
for i=2:N;
    Pg(i)=Pg(i)+PSVC(i);
    Pi(i)=(Pl(i)-Pg(i));
    Qi(i)=(Ql(i)-Qg(i));
    In(i)= (Pi(i)-j*Qi(i))/(conj(V(i)))-j*Iqq(i);
    Inp(i)=real(In(i));
    Inq(i)=imag(In(i));
    Qii(i)=Vq(i)*Inp(i)-Vp(i)*Inq(i);
    Pg(i)=Pg(i)-PSVC(i);
    QSVC(i)=Q;
end
for i=1:N
    SVCPF(i)=cos(atan(-QSVC(i)/PSVC(i))); % Power Factor of SVC
end
```

หาตำแหน่งที่ดีที่สุดเพื่อให้สอดคล้องกับขนาดของ SVC

```
%Finding the best location to place SVC of corresponding size
for i=1:N
    Pi(i)=(Pg(i)-Pl(i));
    Qi(i)=(Qg(i)-Ql(i));
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%% SVC from PSO %%%%%%%%%%%%%%
% gg=generation
% PSVC=Fbest;


PSVC=H;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Ploss=zeros(gg,1);
Qloss=zeros(gg,1);

for m=1:gg    % location of SVC

    for nn=1:N
    if PSVC(2,m)==nn
    Pi(nn)=Pi(nn)+PSVC(1,m);


    for i=1:N  % i is the bus contating SVC...we will test by placing one by
one in each bus
        for k=1:N

Ploss(m)=Ploss(m)+(alpha(i,k)*(Pi(i)*Pi(k)+Qi(i)*Qi(k))+beta(i,k)*(Qi(i)*Pi(k)
-Pi(i)*Qi(k))); % approximate loss calculation

Qloss(m)=Qloss(m)+(gama(i,k)*(Pi(i)*Pi(k)+Qi(i)*Qi(k))+geta(i,k)*(Qi(i)*Pi(k)-
Pi(i)*Qi(k))); % approximate loss calculation
        end
    end

    Pi(nn)=Pi(nn)-PSVC(1,m);
    end

    end

end
```

```
for i=1:gg;
    result(i,1)=PSVC(2,i);
    result(i,2)=PSVC(1,i)*baseMVA;
    result(i,3)=Ploss(i)*baseMVA*1000;
    result(i,4)=Qloss(i)*baseMVA*1000;
end
```

<u>แสดงผลการหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดของ SVC โดยใช้ PSO</u>

```
BusRanking=sortrows(result,[3]);
% BusRanking=result;
fprintf('\n')
fprintf('\t\t\t  Optimal placement of SVC using particle swarm
optimization.\n')
fprintf('\t\t\t\t\t Program By: JAKKARIN  WISETYA\n\n')
fprintf('\t\t\t ***  Considering reduce real power loss in system.  ***\n\n')
fprintf('\t\t\t The Real Power Loss in the original System       = %3.4f
kW\n',Plss*baseMVA*1000)
fprintf('\t\t\t The Reactive Power Loss in the original System   = %3.4f
KVar\n',Qlss*baseMVA*1000)
fprintf('\n')
fprintf('\t\t\t-----------------------------------------------------------------
\n')
fprintf('\t\t\tBUS\t\t SVC SIZE\t\t PLoss\t\t QLoss\n')
fprintf('\t\t\tNo:\t\t   MVA   \t\t kW  \t\t kVar\n')
fprintf('\t\t\t-----------------------------------------------------------------
\n')
for m=1:gg;%N-1;
    fprintf('\t\t\t %g', BusRanking(m,1))
    fprintf('\t\t %3.4f', BusRanking(m,2))
    fprintf('\t\t %3.4f', BusRanking(m,3))
    fprintf(' \t%3.4f', BusRanking(m,4)), fprintf(' \n')
end
fprintf('\t\t\t-----------------------------------------------------------------
\n')

% mean(result(:,3))
```

……

<u>โปรแกรมค้าหาตำแหน่งและขนาดของ SVC</u>

```
%% OPTIMAL PLACEMENT OF SVC  33 BUS RADIAL DISTRIBUTION %%
%CaseSVC.m
%=================================================================
% this program finds the optimal SVC size and location when SVC supply real
power only
clear;
clc;
input33;
% inputBus33;
bustype=bus(:,2);
Pl=bus(:,3)/baseMVA;
Ql=bus(:,4)/baseMVA;
FN = branch(:,1);
TN = branch(:,2);
R = branch(:,3);
X = branch(:,4);
B = branch(:,5);
N=length(bustype);
Pg=zeros(N,1);
Qg=zeros(N,1);
V=DLF(bustype,Pg,Qg,Pl,Ql,FN,TN,R,X,B,baseMVA);
zbus=Zbus(branch);
```

```
% Finding Optimal Size of the SVC When SVC supply Real Power Only
Rik=real(zbus);                             % finding R bus
Xik=imag(zbus);                             % finding Xbus
for i=1:N
    Pi(i)=(Pg(i)-Pl(i));
    Qi(i)=(Qg(i)-Ql(i));
end
Vm=abs(V);
Delta=angle(V);
for i=1:N
    for k=1:N
        alpha(i,k)=Rik(i,k)*cos(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
        beta(i,k)=Rik(i,k)*sin(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
        gama(i,k)=Xik(i,k)*cos(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
        geta(i,k)=Xik(i,k)*sin(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
    end
end
```

<u>คำนวณหากำลังไฟฟ้าสูญเสียแรกเริ่ม</u>

```
% Finding the Original Loss
Plss=0;
Qlss=0;
for i=1:N
    for k=1:N
% approximate loss calculation
 Plss=Plss+(alpha(i,k)*(Pi(i)*Pi(k)+Qi(i)*Qi(k))+beta(i,k)*(Qi(i)*Pi(k)-
Pi(i)*Qi(k)));
% approximate loss calculation
 Qlss=Qlss+(gama(i,k)*(Pi(i)*Pi(k)+Qi(i)*Qi(k))+geta(i,k)*(Qi(i)*Pi(k)-
Pi(i)*Qi(k)));
    end
end
for i=1:N
    sum=0;
    for k=1:N
        if k~=i
            sum=sum+(alpha(i,k)*Pi(k)-beta(i,k)*Qi(k));
        end
    end
% PSVC is the optimal size of the SVC to be placed at node i.
    PSVC(i)=Pl(i) - sum/alpha(i,i);
end
```

%%

<u>การค้นหาขนาดของ SVC</u>

```
%%Iteration for finding the size of SVC for each bus when SVC supports Voltage
for m=2:N
    dDPG=1;
    dDPGmin=0.0001;
    while dDPG>dDPGmin
        SVC=PSVC(m);
        Pg(m)=PSVC(m)+Pg(m);
```

<u>รันโหลดโฟลว์</u>

```
% running the Distribution Load Flow with Voltage Support
%m is the bus where SVC with voltage support is to be installed
 [V,Iq]=DLFVS(m,bustype,Pg,Qg,Pl,Ql,FN,TN,R,X,B,baseMVA);
        Vm=abs(V);
        Delta=angle(V);
```

```
        XC=1.1708;
        XL=0.4925;
        alphaSVC=90*pi/180;
        for alphaSVC=90*pi/180;
            Be=(2*alphaSVC-sin(2*alphaSVC)-pi*(2-XL/XC))/pi*XL;
            ISVC=V(aa)*Be;
            Q=V(aa)^2*Be;
        End
```

อัพเดทมุม Alpha, Beta, Gama และ Geta

```
       %Updating the value of alpha, beta, gama and geta
        for i=1:N
            for k=1:N
                alpha(i,k)=Rik(i,k)*alphaSVC;
                beta(i,k)=Rik(i,k)*sin(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
                gama(i,k)=Xik(i,k)*cos(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
                geta(i,k)=Xik(i,k)*sin(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
            end
        end
```

อัพเดทกำลังไฟฟ้าจริงของ SVC

```
       %Updating the Real Power supplied by SVC
        for i=1:N
            Pi(i)=(Pg(i)-Pl(i));
            Qi(i)=(Qg(i)-Ql(i));
        end
        sum=0;
        for k=1:N
            if k~=m
                sum=sum+(alpha(m,k)*Pi(k)-beta(m,k)*Qi(k));
            end
        end
        PSVC(m)=Pl(m) - sum/alpha(m,m);  % PSVC is the optimal SVC size to be
placed at node i.
        dDPG=abs(PSVC(m)-SVC);
        Pg(m)=Pg(m)-SVC;
        Vp(m)=real(V(m));
        Vq(m)=imag(V(m));
        Iqq(m)=Iq;
    end
end
```

หากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟและเพาเวอร์แฟคเตอร์ของ SVC

```
% Finding the reactive power of SVC and SVC power factor
for i=2:N;
    Pg(i)=Pg(i)+PSVC(i);
    Pi(i)=(Pl(i)-Pg(i));
    Qi(i)=(Ql(i)-Qg(i));
    In(i)= (Pi(i)-j*Qi(i))/(conj(V(i)))-j*Iqq(i);
    Inp(i)=real(In(i));
    Inq(i)=imag(In(i));
    Qii(i)=Vq(i)*Inp(i)-Vp(i)*Inq(i);
    Pg(i)=Pg(i)-PSVC(i);
    QSVC(i)=Q;
end
for i=1:N
    SVCPF(i)=cos(atan(-QSVC(i)/PSVC(i))); % Power Factor of SVC
end
%Finding the best location to place SVC of corresponding size
for i=1:N
```

```
    Pi(i)=(Pg(i)-Pl(i));
    Qi(i)=(Qg(i)-Ql(i));
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Ploss=zeros(N,1);
Qloss=zeros(N,1);
for m=2:N    % location of SVC
    Pi(m)=Pi(m)+PSVC(m);
    for i=1:N  % i is the bus contating SVC...we will test by placing one by
one in each bus
        for k=1:N

Ploss(m)=Ploss(m)+(alpha(i,k)*(Pi(i)*Pi(k)+Qi(i)*Qi(k))+beta(i,k)*(Qi(i)*Pi(k)
-Pi(i)*Qi(k))); % approximate loss calculation

Qloss(m)=Qloss(m)+(gama(i,k)*(Pi(i)*Pi(k)+Qi(i)*Qi(k))+geta(i,k)*(Qi(i)*Pi(k)-
Pi(i)*Qi(k))); % approximate loss calculation
        end
    end
    Pi(m)=Pi(m)-PSVC(m);
end

clc
for i=1:N-1;
    result(i,1)=i+1;
    result(i,2)=PSVC(i+1)*baseMVA;
    result(i,3)=Ploss(i+1)*baseMVA*1000;
    result(i,4)=Qloss(i+1)*baseMVA*1000;
    result(i,5)=Vm(i+1)*baseKV;
end
```

<u>แสดงผลการหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดของ SVC</u>

```
BusRanking=sortrows(result,[1]);
fprintf('\n')
fprintf('\t Optimal Size of SVC for Each Bus and Corresponding Losses\n')
fprintf('\t\t\t\t\t Program By: JAKKARIN WISETYA\n\n')
fprintf('\t The Real Power Loss in the original System       = %3.4f
kW\n',Plss*baseMVA*1000)
fprintf('\t The Reactive Power Loss in the original System   = %3.4f
kVar\n',Qlss*baseMVA*1000)
fprintf('\n')
fprintf('\t\t-------------------------------------------------------------------
----------\n')
fprintf('\t\t\tBUS\t\t SVC SIZE\t\t   PLoss\t\t      QLoss\t\t
BasekV\t\t\n')
fprintf('\t\t\tNo:\t\t   MVA  \t\t    kW  \t\t       kVar\t\t     kV\t\t\n')
fprintf('\t\t-------------------------------------------------------------------
----------\n')
for m=1:N-1;
    fprintf('\t\t\t %g', BusRanking(m,1))
    fprintf('\t\t %3.4f', BusRanking(m,2))
    fprintf('\t\t\t %3.4f', BusRanking(m,3))
    fprintf('\t\t\t %3.4f', BusRanking(m,4))
    fprintf(' \t\t%3.4f', BusRanking(m,5)), fprintf(' \n')
end
fprintf('\t\t-------------------------------------------------------------------
-----------\n')
```

ภาคผนวก ข.3

โปรแกรมการหาตำแหน่งติดตั้ง STATCOM ที่เหมาะสมโดยใช้ PSO

ข้อมูลบัส

```
% input33.m
%% system MVA base
clear
clc
% base MVA = 10 MVA;
baseMVA = 10;
% Base kV = 12.66 kV;
baseKV=12.66;
%% bus data
bus = [
%bus_i type Pd      Qd      Gs   Bs  area Vm  Va  baseKV zone Vmax    Vmin
% ==== === =====   =====   === === === === ===  ====== ==== ====    ======
     1  3   0       0       0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     2  1   0.1     0.06    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     3  1   0.09    0.04    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     4  1   0.09    0.04    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     5  1   0.09    0.04    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     6  1   0.12    0.08    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     7  1   0.09    0.05    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     8  1   0.09    0.04    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     9  1   0.06    0.03    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     10 1   0.42    0.2     0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     11 1   0.09    0.04    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     12 1   0.06    0.02    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     13 1   0.42    0.2     0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     14 1   0.06    0.025   0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     15 1   0.2     0.1     0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     16 1   0.06    0.025   0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     17 1   0.2     0.1     0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     18 1   0.06    0.02    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     19 1   0.06    0.02    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     20 1   0.12    0.07    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     21 1   0.06    0.02    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     22 1   0.2     0.6     0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     23 1   0.045   0.030   0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     24 1   0.15    0.07    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     25 1   0.06    0.035   0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     26 1   0.21    0.1     0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     27 1   0.06    0.035   0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     28 1   0.06    0.04    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     29 1   0.12    0.08    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     30 1   0.06    0.01    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     31 1   0.06    0.02    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     32 1   0.06    0.02    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
     33 1   0.09    0.04    0   0   1   1   0   12.66   1   1.05    0.95;
%    ==================================================================
];
```

ข้อมูลเจนเนอเรเตอร์

```
%% generator data
gen = [
 %  bus  Pg  Qg  Qmax Qmin  Vg   mBase   status  Pmax   Pmin
 %  ===  === === ===  ===   ===  ====    =====   ====   ====
     1   0    0   10  -10  1.05   10       1      10      0;
 %  ========================================================
];
```

<u>ข้อมูลสาขา</u>

```
%% Branch data
branch = [
% fbus  tbus  r         x       b   rateA rateB rateC ratio angle  status
% ====  ====  ===       ===     === ===== ===== ===== ===== =====  ======
  1     2     0.0058    0.0030  0   10    10    10      0     0       1;
  2     3     0.0102    0.0098  0   10    10    10      0     0       1;
  2     4     0.0308    0.0157  0   10    10    10      0     0       1;
  3     5     0.0939    0.0846  0   10    10    10      0     0       1;
  4     6     0.0228    0.0116  0   10    10    10      0     0       1;
  4     7     0.0282    0.0192  0   10    10    10      0     0       1;
  5     8     0.0255    0.0298  0   10    10    10      0     0       1;
  6     9     0.0238    0.0121  0   10    10    10      0     0       1;
  7     10    0.0560    0.0442  0   10    10    10      0     0       1;
  8     11    0.0442    0.0585  0   10    10    10      0     0       1;
  9     12    0.0511    0.0441  0   10    10    10      0     0       1;
  10    13    0.0559    0.0437  0   10    10    10      0     0       1;
  12    14    0.0127    0.0065  0   10    10    10      0     0       1;
  12    15    0.0117    0.0386  0   10    10    10      0     0       1;
  14    16    0.0177    0.0090  0   10    10    10      0     0       1;
  15    17    0.1068    0.0771  0   10    10    10      0     0       1;
  16    18    0.0661    0.0583  0   10    10    10      0     0       1;
  17    19    0.0643    0.0462  0   10    10    10      0     0       1;
  18    20    0.0502    0.0437  0   10    10    10      0     0       1;
  19    21    0.0649    0.0462  0   10    10    10      0     0       1;
  20    22    0.0317    0.0161  0   10    10    10      0     0       1;
  21    23    0.0123    0.0041  0   10    10    10      0     0       1;
  22    24    0.0608    0.0601  0   10    10    10      0     0       1;
  23    25    0.0234    0.0077  0   10    10    10      0     0       1;
  24    26    0.0194    0.0226  0   10    10    10      0     0       1;
  25    27    0.0916    0.0721  0   10    10    10      0     0       1;
  26    28    0.0213    0.0331  0   10    10    10      0     0       1;
  27    29    0.0338    0.0445  0   10    10    10      0     0       1;
  29    30    0.0369    0.0328  0   10    10    10      0     0       1;
  30    31    0.0466    0.0340  0   10    10    10      0     0       1;
  31    32    0.0804    0.1074  0   10    10    10      0     0       1;
  32    33    0.0457    0.0358  0   10    10    10      0     0       1;
% =========================================================================
];
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

bustype=bus(:,2);
N=length(bustype);      % N is the number of nodes
n=N-1;                  % n is the number of sections
j=sqrt(-1);
V=ones(N,1)+j*zeros(N,1);% Flat start
for aa=1:N
    if bustype(aa)==3
        V(aa)=0.98 ;     % Setting the value of voltages of 0.98 for Generator 
bus
    end
end
maxmis=0.0001;          % Maximum mismatch
maxitt=100;             % Maximum iteration
itt=0;
dVmax=1;
Pl=bus(:,3)/baseMVA;
Ql=bus(:,4)/baseMVA;
FN=branch(:,1);
TN=branch(:,2);
R=branch(:,3);
X=branch(:,4);
B=branch(:,5);
Pg=zeros(N,1);
Qg=zeros(N,1);
```

คำนวณอิมพีแดนซ์

```
%  Calculated Impedance
Z=n+1;
zbus=zeros(Z,Z);
zbus(1,1)=0+j*0.000000001;

for bb=1:n
    a=FN(bb);
    b=TN(bb);
    zbus(b,:)=zbus(a,:);
    zbus(:,b)=zbus(:,a);
    zbus(b,b)=zbus(a,a)+R(bb)+j*X(bb);
end
Rik=real(zbus);     % Finding R bus
Xik=imag(zbus);     % Finding X bus
```

แรงดันบัส

```
%%%%%%%-----------------Voltage Bus----------------------%%%%%%%

while itt<maxitt&dVmax>maxmis
    itt=itt+1;
    % Calculating Nodal Current
    for cc=1:N;
        Pi(cc)=(Pl(cc)-Pg(cc));
        Qi(cc)=(Ql(cc)-Qg(cc));
        In(cc,:)=(Pi(cc)-j*Qi(cc))/(conj(V(cc)));  % In is the load current
    end
    for cc=2:N;
        I(cc-1)=In(cc);
    end

%BACKWARD SWEEP
Vk=V;
for dd=1:n;
    a=N-dd;
    for b=1:n;
        if FN(b)==a+1
            c=TN(b);
            I(a)=I(a)+I(c-1)+j*B(c-1)*V(a+1);
        end
    end
    I(a)=I(a)+j*V(a+1)*B(a)/2;  %I is the branch current
end

% FORWARD SWEEP
for ee=1:n;
    ff=FN(ee);
    V(ee+1)=V(ff)-(R(ee)+j*X(ee))*I(ee);
    dV(ee)=abs(V(ee+1)-Vk(ee+1));
end
dVmax=max(dV);
end

for gg=1:N
    Pi(gg)=(Pg(gg)-Pl(gg));
    Qi(gg)=(Qg(gg)-Ql(gg));
end
Vm=abs(V);%*baseKV;
Delta=angle(V);
for hh=1:N
    for ii=1:N
    alpha(hh,ii)=Rik(hh,ii)*cos(Delta(hh)-Delta(ii))/(Vm(hh)*Vm(ii));
```

```
    beta(hh,ii)=Rik(hh,ii)*sin(Delta(hh)-Delta(ii))/(Vm(hh)*Vm(ii));
    gama(hh,ii)=Xik(hh,ii)*cos(Delta(hh)-Delta(ii))/(Vm(hh)*Vm(ii));
    geta(hh,ii)=Xik(hh,ii)*sin(Delta(hh)-Delta(ii))/(Vm(hh)*Vm(ii));
    end
end
```

ขีดจำกัดตำแหน่งและขนาดของ STATCOM

```
LL1=2; %limit of min location
LH1=33;%limit of max location
LL2=2; %limit of min location
LH2=33;%limit of max location
LL3=2; %limit of min location
LH3=33;%limit of max location
SL1=-10;%limit of min size STATCOM
SH1=10; %limit of max size STATCOM
SL2=-10;%limit of min size STATCOM
SH2=10; %limit of max size STATCOM
SL3=-10;%limit of min size STATCOM
SH3=10; %limit of max size STATCOM
```

………

คำนวณหา Zbus

```
% Zbus.m
function[zbus]=Zbus(branch)
% This function calculates the Bus impedance matrix of radial system
FN=branch(:,1);
TN=branch(:,2);
R=branch(:,3);
X=branch(:,4);
B=branch(:,5);
n=length(R);
Z=n+1;
zbus=zeros(Z,Z);
zbus(1,1)=0+j*0.000000001;
% j=sqrt(-1);
for i=1:n
    a=FN(i);
    b=TN(i);
    zbus(b,:)=zbus(a,:);
    zbus(:,b)=zbus(:,a);
    zbus(b,b)=zbus(a,a)+R(i)+j*X(i);
end
```

………

ฟังก์ชันโหลดโฟลว์

```
% DLF.m
function [V,I]=DLF(bustype,Pg,Qg,Pl,Ql,FN,TN,R,X,B,baseMVA)

% This function finds the load flow solution of distribution system with
% one root node and other load buses in the system
N=length(bustype);      % N is the number of nodes
n=N-1;                  % n is the number of sections
j=sqrt(-1);
```

```
V=ones(N,1)+j*zeros(N,1);% Flat start
for i=1:N
    if bustype(i)==3
        V(i)=0.98;      % Setting the value of voltages of 0.98 for Generator
bus
    end
end
maxmis=0.0001;          % Maximum mismatch
maxitt=100;             % Maximum iteration
itt=0;
dVmax=1;
```

การคำนวณ Backward/Forward Sweep

```
% Iteration Start

while itt<maxitt&dVmax>maxmis
    itt=itt+1;
    % Calculating Nodal Current
    for i=1:N;
        Pi(i)=(Pl(i)-Pg(i));
        Qi(i)=(Ql(i)-Qg(i));
        In(i,:)=(Pi(i)-j*Qi(i))/(conj(V(i)));  % In is the load current
    end
    for i=2:N;
        I(i-1)=In(i);
    end

%BACKWARD SWEEP
Vk=V;
for i=1:n;
    a=N-i;
    for b=1:n;
        if FN(b)==a+1
            c=TN(b);
            I(a)=I(a)+I(c-1)+j*B(c-1)*V(a+1);
        end
    end
    I(a)=I(a)+j*V(a+1)*B(a)/2;  %I is the branch current
end

% FORWARD SWEEP
for i=1:n;
    k=FN(i);
    V(i+1)=V(k)-(R(i)+j*X(i))*I(i);
    dV(i)=abs(V(i+1)-Vk(i+1));
end
dVmax=max(dV);
end
```

....

ฟังก์ชันโหลดโฟลว์

```
% DLFVS.m
function [V,Iq,Im]=DLFVS(m,bustype,Pg,Qg,Pl,Ql,FN,TN,R,X,B,baseMVA)

% This function finds the load flow solution of the distribution system

N=length(bustype);      % N is the number of nodes
n=N-1;                  % n is the number of sections
j=sqrt(-1);
```

```
V=ones(N,1)+j*zeros(N,1); % Flast start
for i=1:N
    if bustype(i)==3
        V(i)=0.98;      % Setting the value of voltages of 0.98 for Generator
bus
    end
end
maxmis=0.0001;          % Maximum mismatch
maxitt=100;             % Maximum iteration
itt=0;
dVmax=1;
```

การคำนวณ Backward/Forward Sweep

```
% Iteration Start
while itt<maxitt&dVmax>maxmis
    itt=itt+1;
    % Calculating Nodal Current
    for i=1:N;
        Pi(i)=(Pl(i)-Pg(i));
        Qi(i)=(Ql(i)-Qg(i));
        In(i)=(Pi(i)-j*Qi(i))/(conj(V(i))); % In is the load current
    end
    for i=2:N;
        I(i-1)=In(i);
    end

    % BACKWARD SWEEP
    Vk=V;
    for i=1:n
        a=N-i;
        for b=1:n;
            if FN(b)==a+1
                c=TN(b);
                I(a)=I(a)+I(c-1)+j*B(c-1)*V(a+1);
            end
        end
        I(a)=I(a)+j*V(a+1)*B(a)/2;  % I is the branch current
    end
    for i=1:n
        Jp(i+1)=real(I(i));         % Real part of the branch Current
        Jq(i+1)=imag(I(i));         % Imaginary part of the branch Current
    End
```

การเรียกกระแสมาเพื่อหาแรงดันบัส

```
    % Finding the requied reactive current to support bus voltage
    AA=0;
    BB=0;
    RR=0;
    XX=0;
    aa=m;
    for i=n:-1:1;
        if TN(i)==aa;
            AA=AA+(R(i)*Jp(aa)-X(i)*Jq(aa));
            BB=BB+(X(i)*Jp(aa)-R(i)*Jq(aa));
            RR=RR+R(i);
            XX=XX+X(i);
            aa=FN(i);
        end
    end
    Eqn1=RR^2+XX^2;
    Eqn2=2*((0.98-AA)*XX+(BB-0)*RR);
    Eqn3=(0.98-AA)^2+(BB-0)^2-0.98^2;
```

```
    Eqn=[Eqn1 Eqn2 Eqn3];
    Roots=roots(Eqn);
    for i=1:2
        if abs(Roots(i))<1;
            Iq=Roots(i);    % The required reactive current to support bus
voltage
            break
        end
    end
    aa=m;
    for i=n:-1:1;
        if TN(i)==aa
            Jq(aa)=Jq(aa)+Iq;   % Updating the value of reactive current
upstream
            aa=FN(i);
        end
    end
    j=sqrt(-1);
    for i=1:n;
        Im(i)=Jp(i+1)+j*Jq(i+1);    % Updating the value of branch current
    end

    % FORWARD SWEEP
    for i=1:n;
        k=FN(i);
        V(i+1)=V(k)-(R(i)+j*X(i))*Im(i);
        dV(i)=abs(V(i+1)-Vk(i+1));
    end
    dVmax=max(dV);
end
```

……

การหาตำแหน่งเหมาะสมโดยใช้ PSO

```
% Particle Swarm Optimization%
% TestPSO.m
clear
clc
input33;
%  input33;

% Start Particle Swarm Optimization
% =================================

H=[];
for gg=1:100
NG = 2;
population = 30;
generation = 50;
W = 1;
W_MAX = 0.9; W_MIN = 0.4;
C1 = 2; C2 = 2;
PL = zeros(1,population);
Pbest=1;
bestG=1;
```

ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้า

```
% Limit Power Generation
% =====================
for oo = 1:population
    PG_MIN(1,oo) = -10;
```

```
    PG_MIN(2,oo) = 10;
    PG_MAX(1,oo) = 1;
    PG_MAX(2,oo) =33;
end

velocity = 0.5*PG_MAX;
```

<u>สุ่ม P,Q และตำแหน่งติดตั้ง</u>

```
% Random for P,Q-gen and location
% ================================

RAND_PGL = rand(NG,population);
PGL = RAND_PGL.*PG_MAX;
Pii=Pi;

%-------------------- MAIN Generation Loop -----------------------------%
%======================================================================%

for zz = 1:generation

% Finding the Loss by generate
% PGL(2,:)=round(rand(1,population).*PG_MAX(2,:));
PGL(2,:)=round(PGL(2,:));
        for mm=1:population
            for m=2:N
                if PGL(2,mm)==m
               Pii(m)=Pi(m)+PGL(1,mm);
                end
            end
            if (PGL(2,mm)>1)& (PGL(2,mm)<70)&(PGL(1,mm)<sum(Pl))
                for jj=1:N
                    for kk=1:N

        PL(mm)=PL(mm)+(alpha(jj,kk)*(Pii(jj)*Pii(kk)+Qi(jj)*Qi(kk))...
                     +beta(jj,kk)*(Qi(jj)*Pii(kk)-Pii(jj)*Qi(kk)));
                    end
                end
            else
        PL(mm)=10;
            end

        Pii=Pi;
        end

  PL=(PL-min(PL))/(max(PL)-min(PL));
```

<u>เซ็ตค่า Pbest, Gbest</u>

```
% Set Pbest, Gbest
% ================
    bestP = min(PL);
    bestG = min(bestP,bestG);

    for uu = 1:population
        if PL(1,uu)==bestP
        Pbest = PGL(:,uu);
        end
        if PL(1,uu)==bestG
        Gbest = PGL(:,uu);
        end
    end
```

อัพเดท PG

```
 % Update PG
 % =========
   W = ((W_MAX-W_MIN)*zz)/generation;
%     W = (W_MIN*zz)/generation
%     W=W_MAX-(((W_MAX-W_MIN)/generation)*zz)
%     W=W_MIN +(((W_MAX-W_MIN)/generation)*zz)
   for p = 1:population
       velocity(:,p) = W*velocity(:,p) + C1*rand(1)*(Pbest-
PGL(:,p))+C2*rand(1)*(Gbest-PGL(:,p));

%        for r = 1:NG
%            if velocity(r,p) > 0.5*PG_MAX(r,1)
%               velocity(r,p) = 0.5*PG_MAX(r,1);
%
%           elseif velocity(r,p) < -0.5*PG_MIN(r,1)
%               velocity(r,p) = -0.5*PG_MIN(r,1);
%            end
%        end

       PGL(:,p) = PGL(:,p) + velocity(:,p);

        end

   EVbest(zz,1) = bestP;
   EVbest(zz,2) = bestG;
   PPbest(:,zz)=Pbest;
   GGbest(:,zz)=Gbest;
end
% ========================================================================%
% ----------------------------End Main Loop-----------------------------%
H(:,gg)=Gbest;
end
% calLoss_Real
No_real
mean(result(:,3))
% EVbest
% [PPbest',GGbest']
```

………

แสดงผลขนาดและตำแหน่งของ STATCOM

```
%-------------------- Result of size and location of SVC -----------------%
% No_real.m
% Finding Optimal Size of the SVC When SVC supply Real Power Only
Rik=real(zbus);                              % finding R bus
Xik=imag(zbus);                              % finding Xbus
for i=1:N
    Pi(i)=(Pg(i)-Pl(i));
    Qi(i)=(Qg(i)-Ql(i));
end
Vm=abs(V);
Delta=angle(V);
for i=1:N
    for k=1:N
        alpha(i,k)=Rik(i,k)*cos(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
        beta(i,k)=Rik(i,k)*sin(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
        gama(i,k)=Xik(i,k)*cos(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
        geta(i,k)=Xik(i,k)*sin(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
    end
end
```

คำนวณหากำลังไฟฟ้าสูญเสียแรกเริ่ม

```
% Finding the Original Loss
Plss=0;
Qlss=0;
for i=1:N
    for k=1:N
% approximate loss calculation
 Plss=Plss+(alpha(i,k)*(Pi(i)*Pi(k)+Qi(i)*Qi(k))+beta(i,k)*(Qi(i)*Pi(k)-
Pi(i)*Qi(k)));
% approximate loss calculation
 Qlss=Qlss+(gama(i,k)*(Pi(i)*Pi(k)+Qi(i)*Qi(k))+geta(i,k)*(Qi(i)*Pi(k)-
Pi(i)*Qi(k)));
    end
end
for i=1:N
    sum=0;
    for k=1:N
        if k~=i
            sum=sum+(alpha(i,k)*Pi(k)-beta(i,k)*Qi(k));
        end
    end
% PSTATCOM is the optimal size of the STATCOM to be placed at node i.
    PSTATCOM(i)=Pl(i) - sum/alpha(i,i);
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%Iteration for finding the size of STATCOM for each bus when STATCOM supports
Voltage
for m=2:N
    dDPG=1;
    dDPGmin=0.0001;
    while dDPG>dDPGmin
        STATCOM=PSTATCOM(m);
        Pg(m)=PSTATCOM(m)+Pg(m);
```

รันโหลดโฟลว์

```
% running the Distribution Load Flow with Voltage Support
%m is the bus where STATCOM with voltage support is to be installed
 [V,Iq]=DLFVS(m,bustype,Pg,Qg,Pl,Ql,FN,TN,R,X,B,baseMVA);
        Vm=abs(V);
        Delta=angle(V);
        RC=0.0017;
        XSTATCOM=0.145;
        kSTATCOM=0.9;
        G=1/RC;
        Be=1/XSTATCOM;
        Vdc=V(aa);
for alphaSTATCOM=90*pi/180;
       P=(V(aa)^2*G+kSTATCOM*Vdc*V(aa)*G*cos(Delta(i)-
       alphaSTATCOM)+kSTATCOM*Vdc*V(aa)*Be*sin(Delta(i)-alphaSTATCOM));
        Q=-(V(aa)^2*Be-kSTATCOM*Vdc*V(aa)*Be*cos(Delta(i)-
       alphaSTATCOM)+kSTATCOM*Vdc*V(aa)*G*sin(Delta(i)-alphaSTATCOM));
end
```

อัพเดทมุม Alpha, Beta, Gama และ Geta

```
%Updating the value of alpha, beta, gama and geta

        for i=1:N
            for k=1:N
```

```
                alpha(i,k)=Rik(i,k)*alphaSTATCOM;
                beta(i,k)=Rik(i,k)*sin(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
                gama(i,k)=Xik(i,k)*cos(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
                geta(i,k)=Xik(i,k)*sin(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
            end
        end
```

อัพเดทกำลังไฟฟ้าจริงของ STATCOM

```
         for i=1:N
            Pi(i)=(Pg(i)-Pl(i));
            Qi(i)=(Qg(i)-Ql(i));
        end
        sum=0;
        for k=1:N
            if k~=m
                sum=sum+(alpha(m,k)*Pi(k)-beta(m,k)*Qi(k));
            end
        end
        PSTATCON(m)=Pl(m) - sum/alpha(m,m);  % PSTATCOM is the optimal STATCOM
size to be placed at node i.
        dDPG=abs(PSTATCOM(m)-STATCOM);
        Pg(m)=Pg(m)-STATCOM;
        Vp(m)=real(V(m));
        Vq(m)=imag(V(m));
        Iqq(m)=Iq;
    end
end
```

หากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟและเพาเวอร์แฟคเตอร์ของ STATCOM

```
 % Finding the reactive power of STATCOM and STATCOM power factor
for i=2:N;
    Pg(i)=Pg(i)+PSTATCOM(i);
    Pi(i)=(Pl(i)-Pg(i));
    Qi(i)=(Ql(i)-Qg(i));
    In(i)= (Pi(i)-j*Qi(i))/(conj(V(i)))-j*Iqq(i);
    Inp(i)=real(In(i));
    Inq(i)=imag(In(i));
    Qii(i)=Vq(i)*Inp(i)-Vp(i)*Inq(i);
    Pg(i)=Pg(i)-PSTATCOM(i);
    QSTATCOM(i)=Q;
end
for i=1:N
    STATCOMPF(i)=cos(atan(-QSTATCOM(i)/PSTATCOM(i))); % Power Factor of
STATCOM
end
```

หาตำแหน่งที่ดีที่สุดเพื่อให้สอดคล้องกับขนาดของ STATCOM

```
%Finding the best location to place STATCOM of corresponding size
for i=1:N
    Pi(i)=(Pg(i)-Pl(i));
    Qi(i)=(Qg(i)-Ql(i));
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%% STATCOM from PSO %%%%%%%%%%%%%%
% gg=generation
% PSTATCOM=Fbest;

PSTATCOM=H;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Ploss=zeros(gg,1);
```

```
Qloss=zeros(gg,1);
for m=1:gg    % location of STATCOM

    for nn=1:N
    if PSTATCOM(2,m)==nn
    Pi(nn)=Pi(nn)+PSTATCOM(1,m);

    for i=1:N  % i is the bus contating STATCOM...we will test by placing one
by one in each bus
        for k=1:N

Ploss(m)=Ploss(m)+(alpha(i,k)*(Pi(i)*Pi(k)+Qi(i)*Qi(k))+beta(i,k)*(Qi(i)*Pi(k)
-Pi(i)*Qi(k))); % approximate loss calculation

Qloss(m)=Qloss(m)+(gama(i,k)*(Pi(i)*Pi(k)+Qi(i)*Qi(k))+geta(i,k)*(Qi(i)*Pi(k)-
Pi(i)*Qi(k))); % approximate loss calculation
        end
    end

    Pi(nn)=Pi(nn)-PSTATCOM(1,m);
    end

    end
end


for i=1:gg;
    result(i,1)=PSTATCOM(2,i);
    result(i,2)=PSTATCOM(1,i)*baseMVA;
    result(i,3)=Ploss(i)*baseMVA*1000;
    result(i,4)=Qloss(i)*baseMVA*1000;
end
```

แสดงผลการหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดของ STATCOM โดยใช้ PSO

```
BusRanking=sortrows(result,[3]);
% BusRanking=result;
fprintf('\n')
fprintf('\t\t\t  Optimal placement of STATCOM using particle swarm
optimization.\n')
fprintf('\t\t\t\t\t Program By: JAKKARIN  WISETYA\n\n')
fprintf('\t\t\t *** Considering reduce real power loss in system.  ***\n\n')
fprintf('\t\t\t The Real Power Loss in the original System            = %3.4f
kW\n',Plss*baseMVA*1000)
fprintf('\t\t\t The Reactive Power Loss in the original System        = %3.4f
KVar\n',Qlss*baseMVA*1000)
fprintf('\n')
fprintf('\t\t\t--------------------------------------------------------------
\n')
fprintf('\t\t\tBUS\t\t STATCOM SIZE\t\t PLoss\t\t QLoss\n')
fprintf('\t\t\tNo:\t\t   MVA   \t\t     kW  \t\t kVar\n')
fprintf('\t\t\t--------------------------------------------------------------
\n')
for m=1:gg;%N-1;
    fprintf('\t\t\t %g', BusRanking(m,1))
    fprintf('\t\t %3.4f', BusRanking(m,2))
    fprintf('\t\t %3.4f', BusRanking(m,3))
    fprintf(' \t%3.4f', BusRanking(m,4)), fprintf(' \n')
end
fprintf('\t\t\t--------------------------------------------------------------
\n')

% mean(result(:,3))
```

………

โปรแกรมค้าหาตำแหน่งและขนาดของ STATCOM

```
%% OPTIMAL PLACEMENT OF SVC  33 BUS RADIAL DISTRIBUTION %%
%CaseSTATCOM.m
%=====================================================================
% this program finds the optimal STATCOM size and location when STATCOM supply
real power only
clear;
clc;

input33;
% inputBus33;
bustype=bus(:,2);
Pl=bus(:,3)/baseMVA;
Ql=bus(:,4)/baseMVA;
FN = branch(:,1);
TN = branch(:,2);
R = branch(:,3);
X = branch(:,4);
B = branch(:,5);
N=length(bustype);
Pg=zeros(N,1);
Qg=zeros(N,1);
V=DLF(bustype,Pg,Qg,Pl,Ql,FN,TN,R,X,B,baseMVA);
zbus=Zbus(branch);
% Finding Optimal Size of the STATCOM When STATCOM supply Real Power Only
Rik=real(zbus);                              % finding R bus
Xik=imag(zbus);                              % finding Xbus
for i=1:N
    Pi(i)=(Pg(i)-Pl(i));
    Qi(i)=(Qg(i)-Ql(i));
end
Vm=abs(V);
Delta=angle(V);
for i=1:N
    for k=1:N
        alpha(i,k)=Rik(i,k)*cos(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
        beta(i,k)=Rik(i,k)*sin(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
        gama(i,k)=Xik(i,k)*cos(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
        geta(i,k)=Xik(i,k)*sin(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
    end
```

คำนวณหากำลังไฟฟ้าสูญเสียแรกเริ่ม

```
% Finding the Original Loss
Plss=0;
Qlss=0;
for i=1:N
    for k=1:N
% approximate loss calculation
 Plss=Plss+(alpha(i,k)*(Pi(i)*Pi(k)+Qi(i)*Qi(k))+beta(i,k)*(Qi(i)*Pi(k)-
Pi(i)*Qi(k)));
% approximate loss calculation
 Qlss=Qlss+(gama(i,k)*(Pi(i)*Pi(k)+Qi(i)*Qi(k))+geta(i,k)*(Qi(i)*Pi(k)-
Pi(i)*Qi(k)));
    end
end
for i=1:N
    sum=0;
    for k=1:N
        if k~=i
            sum=sum+(alpha(i,k)*Pi(k)-beta(i,k)*Qi(k));
        end
    end
% PSTATCOM is the optimal size of the STATCOM to be placed at node i.
```

```
    PSTATCOM(i)=Pl(i) - sum/alpha(i,i);
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

การค้นหาขนาดของ STATCOM

```
%%Iteration for finding the size of STATCOM for each bus when STATCOM supports
Voltage
for m=2:N
    dDPG=1;
    dDPGmin=0.0001;
    while dDPG>dDPGmin
        STATCOM=PSTATCOM(m);
        Pg(m)=PSTATCOM(m)+Pg(m);
```

รันโหลดโฟลว์

```
% running the Distribution Load Flow with Voltage Support
%m is the bus where STATCOM with voltage support is to be installed
 [V,Iq]=DLFVS(m,bustype,Pg,Qg,Pl,Ql,FN,TN,R,X,B,baseMVA);
        Vm=abs(V);
        Delta=angle(V);
        RC=0.0017;
        XSTATCOM=0.145;
        kSTATCOM=0.9;
        G=1/RC;
        Be=1/XSTATCOM;
        Vdc=V(aa);
for alphaSTATCOM=90*pi/180;
        P=(V(aa)^2*G+kSTATCOM*Vdc*V(aa)*G*cos(Delta(i)-
       alphaSTATCOM)+kSTATCOM*Vdc*V(aa)*Be*sin(Delta(i)-alphaSTATCOM));
        Q=-(V(aa)^2*Be-kSTATCOM*Vdc*V(aa)*Be*cos(Delta(i)-
       alphaSTATCOM)+kSTATCOM*Vdc*V(aa)*G*sin(Delta(i)-alphaSTATCOM));
end
```

อัพเดทมุม Alpha, Beta, Gama และ Geta

```
       %Updating the value of alpha, beta, gama and geta
        for i=1:N
            for k=1:N
                alpha(i,k)=Rik(i,k)*alphaSTATCOM;
                beta(i,k)=Rik(i,k)*sin(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
                gama(i,k)=Xik(i,k)*cos(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
                geta(i,k)=Xik(i,k)*sin(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
            end
        end
```

อัพเดทกำลังไฟฟ้าจริงของ STATCOM

```
%Updating the Real Power supplied by STATCOM
        for i=1:N
            Pi(i)=(Pg(i)-Pl(i));
            Qi(i)=(Qg(i)-Ql(i));
        end
        sum=0;
        for k=1:N
            if k~=m
                sum=sum+(alpha(m,k)*Pi(k)-beta(m,k)*Qi(k));
            end
        end
```

```
        PSTATCON(m)=Pl(m) - sum/alpha(m,m);  % PSTATCOM is the optimal STATCOM
size to be placed at node i.
        dDPG=abs(PSTATCOM(m)-STATCOM);
        Pg(m)=Pg(m)-STATCOM;
        Vp(m)=real(V(m));
        Vq(m)=imag(V(m));
        Iqq(m)=Iq;
    end
end
```

หากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟและเพาเวอร์แฟคเตอร์ของ STATCOM

```
% Finding the reactive power of STATCOM and STATCOM power factor
for i=2:N;
    Pg(i)=Pg(i)+PSTATCOM(i);
    Pi(i)=(Pl(i)-Pg(i));
    Qi(i)=(Ql(i)-Qg(i));
    In(i)= (Pi(i)-j*Qi(i))/(conj(V(i)))-j*Iqq(i);
    Inp(i)=real(In(i));
    Inq(i)=imag(In(i));
    Qii(i)=Vq(i)*Inp(i)-Vp(i)*Inq(i);
    Pg(i)=Pg(i)-PSTATCOM(i);
    QSTATCOM(i)=Q;
end
for i=1:N
    STATCOMPF(i)=cos(atan(-QSTATCOM(i)/PSTATCOM(i))); % Power Factor of
STATCOM
end
%Finding the best location to place STATCOM of corresponding size
for i=1:N
    Pi(i)=(Pg(i)-Pl(i));
    Qi(i)=(Qg(i)-Ql(i));
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Ploss=zeros(N,1);
Qloss=zeros(N,1);
for m=2:N    % location of STATCOM
    Pi(m)=Pi(m)+PSTATCOM(m);
    for i=1:N  % i is the bus contating STATCOM...we will test by placing one
by one in each bus
        for k=1:N

Ploss(m)=Ploss(m)+(alpha(i,k)*(Pi(i)*Pi(k)+Qi(i)*Qi(k))+beta(i,k)*(Qi(i)*Pi(k)
-Pi(i)*Qi(k))); % approximate loss calculation

Qloss(m)=Qloss(m)+(gama(i,k)*(Pi(i)*Pi(k)+Qi(i)*Qi(k))+geta(i,k)*(Qi(i)*Pi(k)-
Pi(i)*Qi(k))); % approximate loss calculation
        end
    end
    Pi(m)=Pi(m)-PSTATCOM(m);
end


clc
for i=1:N-1;
    result(i,1)=i+1;
    result(i,2)=PSTATCOM(i+1)*baseMVA;
    result(i,3)=Ploss(i+1)*baseMVA*1000;
    result(i,4)=Qloss(i+1)*baseMVA*1000;
    result(i,5)=Vm(i+1)*baseKV;
end
```

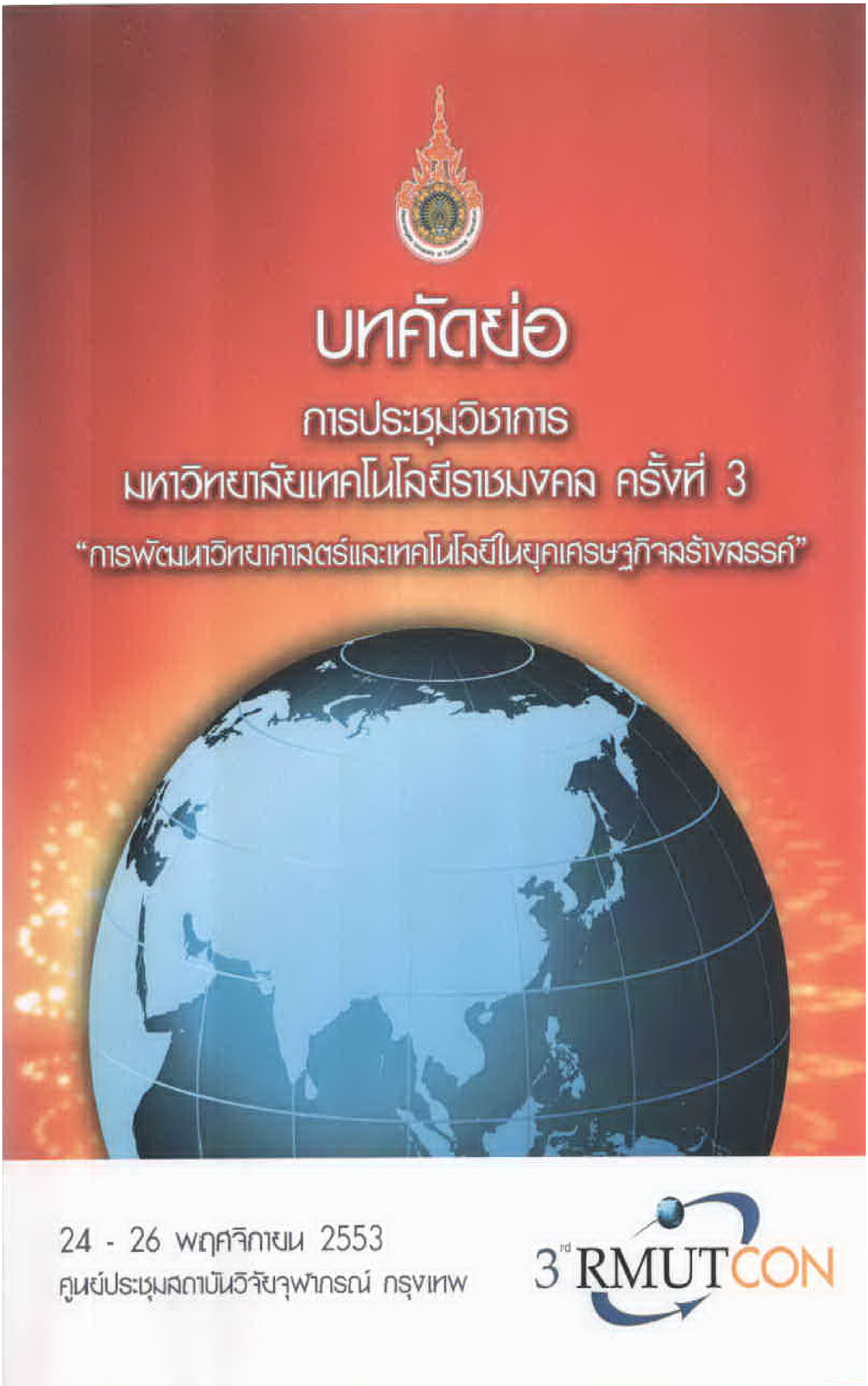
<u>แสดงผลการหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดของ STATCOM</u>

```
BusRanking=sortrows(result,[1]);
fprintf('\n')
fprintf('\t Optimal Size of STATCOM for Each Bus and Corresponding Losses\n')
fprintf('\t\t\t\t\t Program By: JAKKARIN WISETYA\n\n')
fprintf('\t The Real Power Loss in the original System       = %3.4f
kW\n',Plss*baseMVA*1000)
fprintf('\t The Reactive Power Loss in the original System   = %3.4f
kVar\n',Qlss*baseMVA*1000)
fprintf('\n')
fprintf('\t\t-------------------------------------------------------------------
----------\n')
fprintf('\t\t\tBUS\t\t STATCOM SIZE\t\t PLoss\t\t      QLoss\t\t
BasekV\t\t\n')
fprintf('\t\t\tNo:\t\t   MVA  \t\t      kW  \t\t       kVar\t\t     kV\t\t\n')
fprintf('\t\t-------------------------------------------------------------------
----------\n')
for m=1:N-1;
    fprintf('\t\t\t %g', BusRanking(m,1))
    fprintf('\t\t %3.4f', BusRanking(m,2))
    fprintf('\t\t\t %3.4f', BusRanking(m,3))
    fprintf('\t\t\t %3.4f', BusRanking(m,4))
    fprintf(' \t\t%3.4f', BusRanking(m,5)), fprintf(' \n')
end
fprintf('\t\t-------------------------------------------------------------------
-----------\n')
```

ภาคผนวก ค

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี


บทคัดย่อ
การประชุมวิชาการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 3
“การพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในยุคเศรษฐกิจสร้างสรรค์”
24 - 26 พฤศจิกายน 2553
ศูนย์ประชุมสถาบันวิจัยจุฬาภรณ์ กรุงเทพ
3rd RMUTCON

ภาคบรรยาย (ต่อ)

NE-EE-023	การปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่าย 22 kV อ.เขาคิชฌกูฏ จ.จันทบุรี **ดนัย ทองธวัช กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์**	39
NE-EE-027	มูลค่าความเสียหายจากเหตุการณ์ไฟฟ้าขัดข้องของกลุ่มพาณิชยกรรม ในประเทศไทย ด้วยวิธีการฟัซซีโลจิก **ปริญญา สมเงิน ธเนศ เดชโหมด ภานุวัฒน์ เทียนศรี พรระพีพัฒน์ ภาสบุตร วรรัตน์ ปัตรประกร**	40
NE-EE-030	การศึกษาการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้โปรแกรม PSAT **จักรินทร์ วิเศษยา กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์**	41
NE-EL-002	การเพิ่มประสิทธิภาพโครงข่ายประสาทเทียม LVQ โดยการเพิ่มจำนวนโหนดที่ใช้พิจารณา **จิราพร เกียรติวุฒิอมร กาญบัญชา พานิชเจริญ**	42
NE-EL-003	การปรับปรุงพาร์ติเคิลฟิลเตอร์ (particle filter) สำหรับการติดตามวัตถุภาพโดยใช้แบบจำลองวัตถุภาพแบบ non Gaussian **ไกรฤกษ์ เชยชื่น โกสินทร์ จำนงไทย**	43
NE-EL-004	การสร้างเครื่องให้อาหารปลาในกระชังแบบอัตโนมัติ ลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา กรณีศึกษา ตำบลเกาะยอ อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา **ปิยะ ประสงค์จันทร์ เจริญชัย ฮวดอุ้ปัด เสนอ สะอาด**	44
NE-EL-005	การออกแบบวงจรอินทีเกรเตอร์แบบไม่สูญเสียที่มีอัตราการขยายสูงทำงานภายใต้แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงขนาด 1.5 โวลต์ **เสนอ สะอาด ดรุณี ชายทอง**	45
NE-EL-007	การวิเคราะห์ความเข้มของสีใบข้าวด้วยซัพพอร์ตเวกเตอร์สำหรับการถดถอยเพื่อลดต้นทุนในการผลิต **เอกลักษณ์ สุมนพันธ์ ประมูล บัวน้อย**	46
NE-EL-010	การจำแนกข้อมูลโดยวิธีการรวมกลุ่มของเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมโดยการเลือกตัวแทนที่เหมาะสมด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม **เดช ธรรมศิริ พยุง มีสัจ**	47
NE-EL-011	วงจรกำเนิดสัญญาณซายน์ควอเดรเจอร์โหมดกระแสที่ใช้ CCCDTA กับ CCCII **ดนุพัฒน์ ดวงมาลัย ปรัชญา พนมอุปถัมภ์ วินัย ใจกล้า**	48
NE-EL-013	การแก้ปัญหาการชนกันของเครื่องอ่าน RFID ที่มีการสื่อสารแบบเฟรมอะโลฮา **ธนัสถ์ นนทพุทธ ขจรศักดิ์ พงศ์ธนา วุฒิชัย วิจิตรกุลสวัสดิ์**	49
NE-EL-015	การจำลองการนำทางสำหรับหุ่นยนต์ถูพื้น **วิรัช กองสิน**	50

การศึกษาการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้โปรแกรม PSAT

จักรินทร์ วิเศษยา และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์

บทคัดย่อ บทความนี้นำเสนอการศึกษาการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้โปรแกรม PSAT ศึกษาเพื่อหาค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบไฟฟ้าก่อนถึงสภาวะแรงดันพังทลาย โดยการจำลองกับระบบไฟฟ้ากำลังมาตรฐาน IEEE 14 บัส ใช้วิธี Continuation Power Flow (CPF) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับ กำลังไฟฟ้า ทำให้สามารถรู้ตำแหน่งบัสที่มีความอ่อนแอ เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันมากที่สุด และทราบตำแหน่งบัสที่มีความเหมาะสมของแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลัง ร่วมถึงการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าเพื่อยกระดับแรงดันให้มีเสถียรภาพยิ่งขึ้น ดังนั้นบทความนี้จึงมีประโยชน์โดยตรงต่อหน่วยงาน มหาวิทยาลัยที่มีการเรียนการเรียนระดับบัณฑิตศึกษา

คำสำคัญ : เสถียรภาพแรงดัน, โปรแกรม PSAT,ความต่อเนื่องการไหลของกำลัง

1. บทนำ

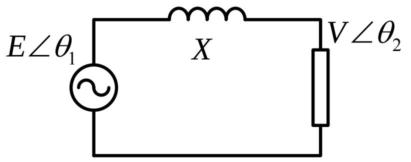
ปัจจุบันความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง อันเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนของประชากร ทำให้ต้องมีการจัดสรรพลังงานไฟฟ้าเพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการที่เพิ่มสูงขึ้นตามจำนวนประชากร การจัดสรรพลังงานต้องพิจารณาทั้งทางด้านเศษฐศาสตร์และความน่าเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าเป็นอีกเรื่องหนึ่งที่มีผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเกิดสภาวะแรงดันพังทลาย [1] งานวิจัยที่ผ่านมาปกติการศึกษาเสถียรภาพจะพบมากสำหรับการวิเคราะห์แบบสถิต เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้า ในการวิเคราะห์แบบพลวัต ส่วนใหญ่ที่ศึกษาเฉพาะในรูปคุณภาพไฟฟ้า [2] ดังนั้นในบทความนี้จะนำเสนอการศึกษาการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้โปรแกรม (Power System Analysis Toolbox, PSAT) พัฒนาโดย Prof.Dr. Federico Milano [3-4]

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ 1 ต. คลองหก อ. ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์: +66(2)-549-3571 โทรสาร: +66(2)-549-3568 E-mail: paisan@rmutt.ac.th

องค์ประกอบของการนำเสนอบทความนี้ประกอบด้วย ลำดับแรกจะกล่าวถึงคำจำกัดความของเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดัน โดยวิธีวิเคราะห์ความต่อเนื่องการไหลของกำลัง CPF หาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับกำลังไฟฟ้าจริง เพื่อหาค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดโปรแกรม PSAT และการนำโปรแกรม PSAT ไปวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันระบบไฟฟ้ากำลังมาตรฐาน IEEE 14 บัส สุดท้ายจะกล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะต่างๆสำหรับงานวิจัยลำดับต่อไป

2. เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า

เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า คือ ความสามารถของระบบในการรักษาระดับของแรงดันให้คงที่ทุกบัสในระบบหลังจาก เกิดปัญหาขึ้นภายในระบบ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการรักษาและฟื้นฟูความสมดุลระหว่างโหลดกับแหล่งจ่ายพลังงานในระบบ [5] ความไม่มีเสถียรภาพของแรงดันนี้อาจเกิดขึ้นจากแรงดันที่บัสลดลงเนื่องมาจากการสูญเสียที่โหลดหรือการสูญเสียในสายส่งทำให้เกิดสภาวะแรงดันพังทลาย [6]



รูปที่ 1 ระบบไฟฟ้ากำลัง 2 บัส

รูปที่ 1 ที่ $E\angle\theta_1$ คือแรงดันที่จุดต่อของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Sending End Bus), $V\angle\theta_2$ คือแรงดันที่จุดต่อของโหลด (Receiving End Bus), X คือค่ารีแอคแตนซ์ของสาย สามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคตีฟ โดยที่ δ มีค่าเท่ากับ $\theta_1 - \theta_2$ เมื่อ $\theta_1 = 0$ จะได้สมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$P = \frac{EV}{X}\sin\delta \tag{1}$$

$$Q = -\frac{V^2}{X} + \frac{EV}{X}\cos\delta \tag{2}$$

จากสมการที่ (1)และ (2) แรงดันที่โหลดจะมีค่าดังสมการ

$$V = \sqrt{\frac{E^2 - 2QX \pm \sqrt{\left(E^2 - 2QX\right)^2 - 4\left(P^2 + Q^2\right)X^2}}{2}} \tag{3}$$

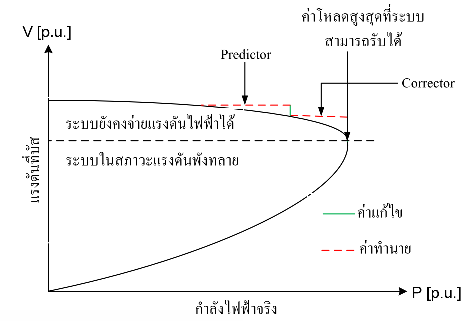
3. การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันโดยวิธี CPF

การศึกษาเสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้าเพื่อหาขีดจำกัดของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยการหาค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดที่ระบบสามารถจ่ายได้ก่อนถึงสภาวะแรงดันพังทลาย แรงดันที่บัสจะค่อยๆ ลดลงเมื่อความต้องการโหลดเพิ่มมากขึ้น การฉีดกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคตีฟเข้าไปแต่ละบัสของระบบไฟฟ้ากำลัง สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4) และ (5)

$$P_i = \sum_{j=1}^{n} |V_i||V_j||Y_{ij}|\cos\left(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j\right) \tag{4}$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^{n} |V_i||V_j||Y_{ij}|\sin\left(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j\right) \tag{5}$$

เมื่อ P_i และ Q_i เป็นกำลังไฟฟ้าที่ออกไปที่บัส i, $|Y_{ij}|$ และ θ_{ij} คือ ค่ายอดและมุมเฟสระหว่างบัส i และ j ที่เป็นองค์ประกอบของเมตริกซ์ $|V_i|$ และ δ_i คือค่ายอดและมุมเฟสของแรงดันที่บัส เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าเมื่อมีการคำนวณสมการแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยใช้วิธี Continuation Power Flow (CPF) ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขั้นตอนการคำนวณโดยวิธี CPF

ซึ่งวิธี CPF เป็นวิธีหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ทั้งบนและล่างเพื่อหาค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุด CPF จะทำงานซ้ำไปเป็นขั้นๆ คือการทำนายค่า (Predictor) และการหาค่าที่ถูกต้อง (Corrector) โดยสมการจะคล้ายสมการโหลดโฟล์ว แต่จะมีการเพิ่มโหลดคือเพิ่มค่าพารามิเตอร์ (λ) ต่อท้ายสมการโหลดโฟล์ว สำหรับการเริ่มต้นของการเพิ่มโหลด สามารถเขียนสมการ (6) หรือ (7) ได้

$$F(\theta, V) = \lambda K \tag{6}$$

$$F(\theta, V, \lambda) = 0 \tag{7}$$

ค่า K คือลักษณะของโหลด และ λ คือค่าพารามิเตอร์ของโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมจนถึงค่าโหลดสูงสุด V คือขนาดแรงดันบัส และ θ มุมของแรงดันบัส จากสมการที่ (6) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้นได้โดยการเทียบอนุพันธ์ค่าพารามิเตอร์จากการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้า (λ) จะมีค่าเป็นบวกเมื่อโหลดเพิ่มขึ้นและค่าแรงดันไฟฟ้ายังอยู่ในสภาวะตามการเพิ่มขึ้นของโหลด แต่จะมีค่าเป็นลบเมื่อค่าของแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจากจุดที่ระบบสามารถรับโหลดได้สูงสุด ค่าทำนาย หาได้จากสมการ

$$\begin{bmatrix} \theta \\ V \\ \lambda \end{bmatrix}^{predict} = \begin{bmatrix} \theta_0 \\ V_0 \\ \lambda_0 \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$\begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ \dots \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{LF} & \vdots & K \\ \dots \quad \dots & \dots & \dots \\ & [e_k] & \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{9}$$

ค่า σ คือ ขนาดของขั้นการเปลี่ยนแปลงในการทำนายครั้งต่อไป ที่ค่าการเพิ่มขึ้นของโหลด $dx_k = 1$ จะได้ค่าดังสมการ(10) และค่าแก้ไขหาได้จากสมการ (11) ตามลำดับ

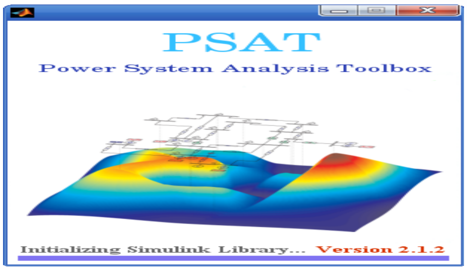
$$x_k^{predict} = x_{k0} + \sigma \qquad (10)$$

$$\begin{bmatrix} F(\theta,V,\lambda) \\ x_k - \eta \end{bmatrix} = [0] \qquad (11)$$

เมื่อ x_k คือ ค่าพารามิเตอร์ของความต่อเนื่องที่เลือกใช้

4.โปรแกรม Power System Analysis Toolbox(PSAT)

PSAT เป็นกล่องเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์ในโปรแกรม MATLAB เพื่อการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังและการจำลองการทำงานของระบบวิเคราะห์ได้ทั้งการวิเคราะห์แบบสถิต และการวิเคราะห์แบบพลวัต [6] สามารถวิเคราะห์การไหลของกำลัง (Power Flow, PF) ความต่อเนื่องการไหลของกำลัง (Continuation Power Flow, CPF) ความเหมาะสมการไหลของกำลัง(Optimal Power Flow, OPF) เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก (Small Signal Stability Analysis, SSSA) การจำลองในเชิงของเวลา (Time Domain Simulation, TDS) และการหาตำแหน่งของการติดตั้งหน่วยเครื่องวัดเฟสเซอร์ที่เหมาะสม (Phasor Measurement Units, PMU) องค์ประกอบการจำลองระบบต่างๆทั้งแบบสถิต (Static Model) และแบบพลวัต (Dynamic Model) จะอยู่ใน PSAT Simulink Libraly ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กับการไหลของกำลัง ความต่อเนื่องและ ความเหมาะสมการไหลของกำลัง และอุปกรณ์อื่นๆ เช่น เซลล์เชื้อเพลิง (Solid Oxide Fuel Cell)



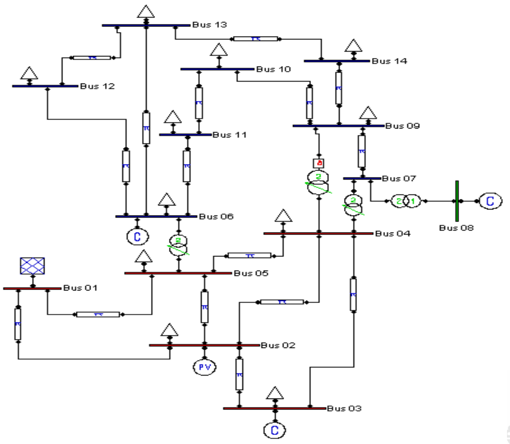
รูปที่ 3 โปรแกรม PSAT

จุดเด่นของโปรแกม PSAT เมื่อเทียบกับโปรแกรมต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ในระบบกำลัง คือดีกว่า (Power Analysis Toolbox, PAT) ที่สามารถวิเคราะห์ความต่อเนื่องการไหลของกำลัง (CPF) ความเหมาะสมการไหลของกำลัง (OPF) และสามารถทำ (GUI)ได้ [7]

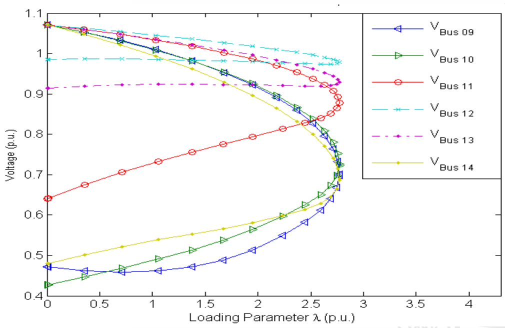
การใช้งานของโปรแกรม PSAT นี้จะใช้งานร่วมกับโปรแกรม MATLAB โดยนำกล่องเครื่องมือต่างๆ ที่มีอยู่ในโปรแกรม PSAT ไปวางไว้ใน Toolbox ของ MATLAB เพื่อให้โปรแกรม PSATและ MATLAB สามารถส่งผ่านข้อมูลและติดต่อสื่อสารระหว่างโปรแกรมทั้งสองได้ เมื่อจะเรียกโปรแกรม PSAT ขึ้นมาใช้งาน ต้องหาโฟลเดอร์ที่เก็บกล่องเครื่องมือต่างๆของโปรแกรม PSAT ตรงโฟลเดอร์ Toolbox ในโปรแกรม MATLAB ออกมาใช้งานที่ Current Directory เพื่อจะสั่งโปรแกรม PSAT ขึ้นมาใช้งาน โดยพิมพ์คำสั่ง PSAT ที่หน้า Command Window ของโปรแกรม MATLAB แล้วโปรแกรม PSAT จะรันขึ้นมาอัตโนมัติพร้อมใช้งาน เลือกวิธีวิเคราะห์ระบบต่างๆ ที่ต้องการจะวิเคราะห์ได้เช่น PF,CPF, OPF, SSSA, TDS , PMU เป็นต้น บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์ความต่อเนื่องการไหลของกำลัง CPF โดยเลือกระบบไฟฟ้ากำลังมาตรฐาน IEEE 14 บัส มาจำลอง

5. ผลและการอภิปรายผล

จากที่กล่าวข้างต้นว่าบทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันโดยใช้โปรแกรม PSAT ของระบบไฟฟ้ากำลังมาตรฐาน IEEE 14 บัส ด้วยวิธี CPF ค่าพารามิเตอร์ของโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมจนถึงค่าโหลดสูงสุดของระบบ (Maximum Loading Parameter, Max.LP) มีค่าเท่ากับ 2.7699 บัสที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันมากที่สุด คือบัสที่ 14 ดังรูปที่ 5 จะเห็นว่าบัสที่ 14 คือบัสที่อ่อนแอที่สุดเนื่องจากเป็นบัสที่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันมากที่สุด

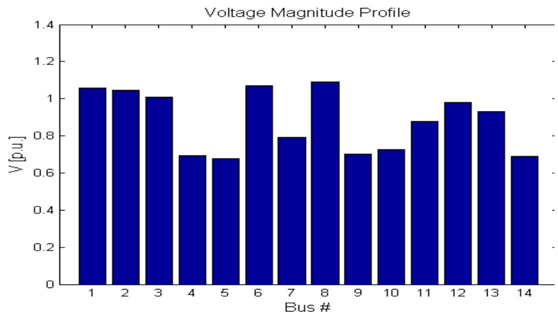


รูปที่ 4 ระบบไฟฟ้ากำลังมาตรฐาน IEEE 14 บัส

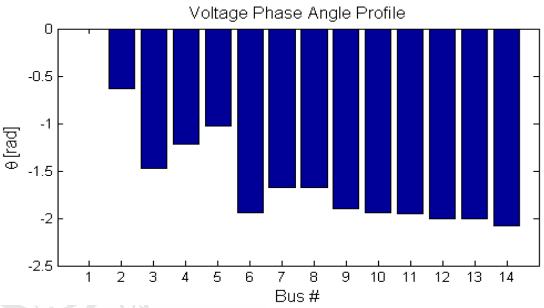


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกำลังไฟฟ้าจริงกับองค์ประกอบโหลดของมาตาฐาน IEEE 14 บัส

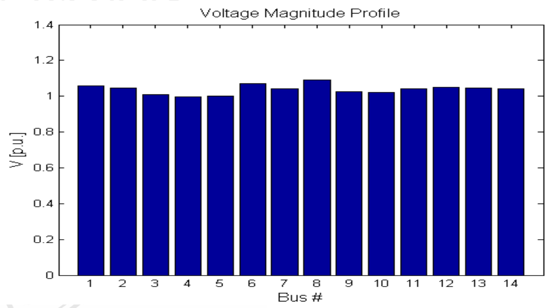
ผลจากการจำลองด้วยวิธี CPF พบว่าแรงดันที่เหมาะสมอยู่ที่บัสที่ 3 ได้ค่าแรงดันขนาด 1.0100 p.u. ดังรูปที่ 6 ซึ่งค่าใกล้เคียง 1.0 p.u. มากที่สุด และเฟสแรงดันมีค่าเท่ากับ -1.4777 rad. และมีเพียงบัสที่ 1 เท่านั้นที่ได้ค่าเฟสแรงดันเท่ากับ 0 rad. ดังรูปที่ 7 ได้ผลรวมของระบบค่ากำลังไฟฟ้าจริงเท่ากับ 22.3256 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ 5.5676 p.u. โดยแยกเป็นผลรวมค่ากำลังไฟฟ้าจริงของโหลดเท่ากับ 10.0438 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของโหลดเท่ากับ 3.1566 p.u. ผลรวมค่ากำลังไฟฟ้าจริงของการสูญเสียเท่ากับ 13.2818 p.u. และค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของการสูญเสียเท่ากับ 2.4110 p.u. แต่หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยSTATCOM ±100MVA 13.8kV 50Hz $-0.2 p.u \le I \le 0.2 p.u.$ ที่บัส 14 แล้ว จะสามารถเปลี่ยนขนาดและเฟสของแรงดันไฟฟ้าได้ จะทำให้ขนาดแรงดันที่บัสแต่ละบัสดีขึ้น ค่าใกล้เคียง 1.0 p.u ดังรูปที่ 8 และ รูปที่ 9 ได้ผลรวมของระบบค่ากำลังไฟฟ้าจริงเท่ากับ 0.7418 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ 0.3003 p.u. โดยแยกเป็นผลรวมค่ากำลังไฟฟ้าจริงของโหลดเท่ากับ 3.7544 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้า รีแอคทีฟของโหลดเท่ากับ 0.9722 p.u. ผลรวมค่ากำลังไฟฟ้าจริงของการสูญเสียเท่ากับ -3.0125 p.u. และค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของการสูญเสียเท่ากับ -0.67194 p.u.



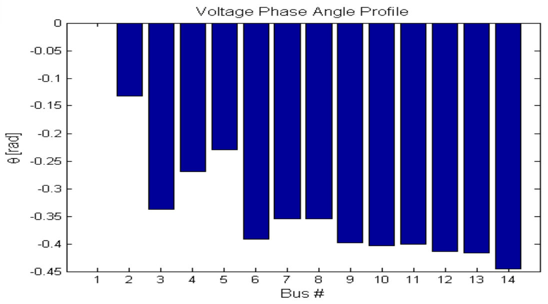
รูปที่ 6 ขนาดแรงดันที่บัส



รูปที่ 7 เฟสแรงดันที่บัส



รูปที่ 8 ขนาดแรงดันที่บัสหลังติดตั้ง STATCOM



รูปที่ 9 มุมเฟสแรงดันที่บัสหลังติดตั้ง STATCOM

6. สรุปผลการวิจัย

บทความนี้นำเสนอการศึกษาการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้โปรแกรม PSAT ช่วยวิเคราะห์และจำลอง ระบบไฟฟ้ากำลังตามมาตรฐาน IEEE 14 บัส ด้วยวิธี CPF พบว่าบัสที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันมากที่สุด คือบัสที่ 14 ดังรูปที่ 5 คือบัสที่อ่อนแอที่สุดเนื่องจากเป็นบัสที่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันมากที่สุดส่วนแรงดันที่เหมาะสมอยู่ที่บัสที่ 3 ได้ค่าแรงดันขนาด 1.0100 p.u และเฟสแรงดันมีค่าเท่ากับ -1.4777 rad. แต่หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ชดเชย STATCOM ที่ 14 แล้ว จะสามารถเปลี่ยนขนาดและเฟสของแรงดันไฟฟ้าได้ ขนาดของแรงดันไฟฟ้า AC สร้างโดย STATCOM เป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงดัน DC บัส จะทำให้ขนาดแรงดันที่บัสแต่ละบัสดีขึ้นค่าใกล้เคียง 1.0 p.u. นำผลที่ได้จากการจำลองระบบมาวิเคราะห์ปรับปรุง เพื่อพัฒนาและแก้ปัญหาเสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้า

7. เอกสารอ้างอิง

[1] A. Sode-Yom, N. Mithulananthan, and K.Y. Lee, M. 2006. A Maximum Loading Margin Method for Static Voltage Stability in Power system. *IEEE Trans. Power System*.

[2] K. Oudsup, P. Boonchaim, and A. Sode-Yom, O. 2009. Improve voltage stability of power systems when associated with induction generators. *32nd Electrical Engineering Conference.*

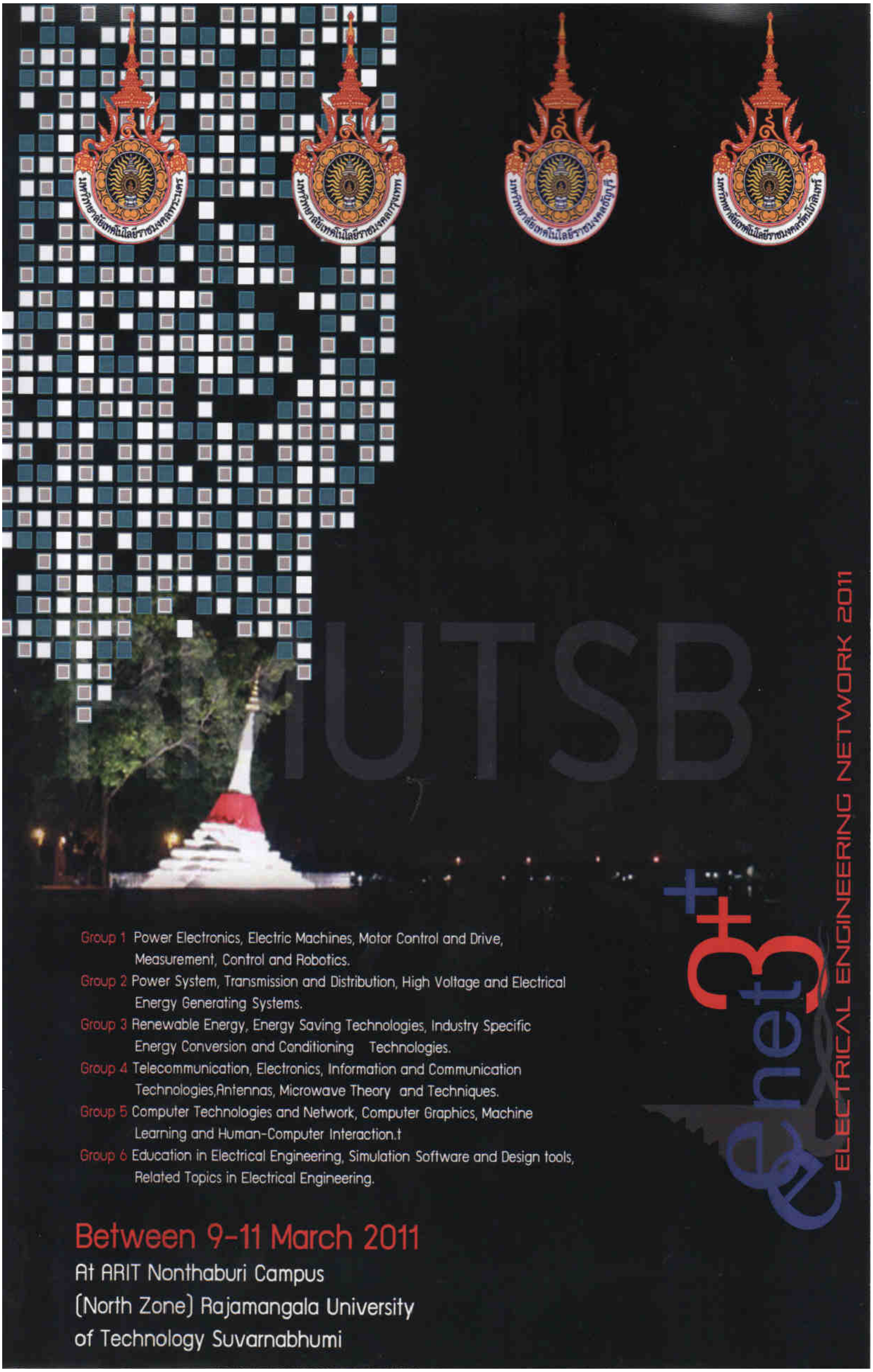
[3] F. Milano, L. Vanfretti, and J.C. Morataya, F.2008. An Open Source Power System Virtual Laboratory The PSAT Case and Experience. *IEEE Trans Power Syst.*.

[4] F. Milano, A. 2003 .Pricing System Security in Electricity Market Models with Inclusion of Voltage Stability Constraints. *Thesis requirement for the degree of Doctor of Philosophy.*

[5] P. Kundur, P.R. 1994. Power System Stability and Control.*NewYork :McGraw-Hill* .

[6] F. Milano, J. 2008. Power System Analysis Toolbox . *Software and Documentation*.

[7] K. Schoder, A. Hasanovic, A. Feliachi, and A. asanovic, F.2003. PAT: A power analysis toolbox for Matlab/Simulink. *IEEE Trans Power Syst.*


IUTSB
ELECTRICAL ENGINEERING NETWORK 2011
Group 1 Power Electronics, Electric Machines, Motor Control and Drive, Measurement, Control and Robotics.
Group 2 Power System, Transmission and Distribution, High Voltage and Electrical Energy Generating Systems.
Group 3 Renewable Energy, Energy Saving Technologies, Industry Specific Energy Conversion and Conditioning Technologies.
Group 4 Telecommunication, Electronics, Information and Communication Technologies,Antennas, Microwave Theory and Techniques.
Group 5 Computer Technologies and Network, Computer Graphics, Machine Learning and Human-Computer Interaction.t
Group 6 Education in Electrical Engineering, Simulation Software and Design tools, Related Topics in Electrical Engineering.
Between 9-11 March 2011
At ARIT Nonthaburi Campus
(North Zone) Rajamangala University
of Technology Suvarnabhumi

PW2_9 การเปรียบเทียบผลของการใช้งานหม้อแปลงสำหรับอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม 147

PW2_10 การวิเคราะห์ตำแหน่งการติดตั้ง FACTS ที่เหมาะสมในระบบจำหน่าย 151

PW2_11 การกำหนดขนาดและตำแหน่งติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กโดยวิธีการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค 155

PW2_12 การประเมินค่าความเสียหายเนื่องจากไฟดับของผู้ใช้ไฟประเภทอุตสาหกรรมในระบบจำหน่าย 159

PW2_13 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับออกแบบระบบไฟฟ้าอาคารชุด 163

PW2_14 การหาคะแนนความเหมาะสมเพื่อสร้างแผนที่การใช้พื้นที่สำหรับการพยากรณ์ความต้องการไฟฟ้าเชิงพื้นที่: กรณีศึกษาพื้นที่การไฟฟ้านครหลวงเขตบางใหญ่ 167

PW2_15 The effect of Electric Field System for Heat Transfer 171

PW2_16 Power Line Surge Protector 176

EN3_1 ระบบแจ้งเตือนเหตุขัดข้องอัตโนมัติสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ 179

EN3_2 การวิเคราะห์ การประหยัดพลังงานในเครื่องปรับอากาศสำหรับบ้านพักอาศัย 183

EN3_3 ระบบควบคุมการประจุและจ่ายไฟแบตเตอรี่แบบพกพาด้วยเซลล์สุริยะ 187

EN3_4 การวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์ยีในกระบวนการผลิตวุ้นเส้น 191

EN3_5 การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลขนาดเล็กแบบอัตโนมัติ ควบคุมด้วย LabVIEW 195

EN3_6 การประมาณค่าแรงดันกระพริบด้วยวิธีการ Energy Operator 199

EN3_7 ระบบการติดตามดวงอาทิตย์แกนเดี่ยวด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ 203

EN3_8 การออกแบบและสร้างชุดติดตามจุดให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดบนพื้นฐานการควบคุมอัลกอริทึมสำหรับการประยุกต์ใช้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์สมรรถนะสูง 207

EN3_9 ระบบควบคุมเซลล์แสงอาทิตย์ติดตามดวงอาทิตย์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ 211

EN3_10 ระบบเฝ้ามองพฤติกรรม ในขบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบอัตโนมัติ ด้วย SCADA 215

EN3_11 การศึกษาและพัฒนาเครื่องทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 219

EN3_12 การพัฒนาแนวทางการจัดการพลังงานไฟฟ้าของพลังงานลมในบ่อเลี้ยงกุ้ง 223

การวิเคราะห์หาตำแหน่งการติดตั้ง FACTS ที่เหมาะสมในระบบจำหน่าย

Analysis of Optimal Allocation of FACTS Devices in Radial Distribution Systems

จักรินทร์ วิเศษยา และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์

ศูนย์วิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ 1 ต. คลองหก อ. ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110โทรศัพท์: 02-549-3571 โทรสาร: 02-549-3422 E-mail: krischonme.b@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาการวิเคราะห์หาตำแหน่งการติดตั้ง FACTS ที่เหมาะสม การติดตั้ง FACTS เข้าไปเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเข้าสู่ระบบ และปรับปรุงเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้า การวิเคราะห์แบบจำลองของระบบใช้แบบจำลองมาตรฐานของ IEEE 33 บัส 32 สาขา ที่มีกำลังไฟฟ้ารวมของโหลดขนาด 3.72 MW. และ 2.3 MVar. กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่สูญเสียรวมในระบบแรกเริ่มขนาด 221.4346 kW. และ 150.1784 kVar. การคำนวณการไหลของกำลังใช้การคำนวณแรงดันแบบไปข้างหน้า และการคำนวณกระแสแบบย้อนกลับ ผลการจำลองพบว่าขนาดแรงดันที่บัส 1 มีค่า 0.98 p.u ส่วนบัสอื่นๆที่อยู่ไกลออกไปแรงดันที่บัสจะค่อยๆลดลงเรื่อยๆโดยเฉพาะที่ปลายสาย แต่หลังติดตั้ง FACTS เข้าไปในระบบพบว่าขนาดแรงดันที่บัสดีขึ้น ทำให้มีระบบมีเสถียรภาพกำลังไฟฟ้าและความน่าเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ดี

คำสำคัญ: ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล, FACTS, การหาตำแหน่งที่เหมาะสม

Abstract

This paper presents the study of optimal allocation analysis of FACTS devices. FACTS device is the compensation device that use for injection the reaction and active power into the power system in order to improve the voltage stability. This study uses the IEEE 33 buses system for testing system. The total power is 3.72 MW and 2.3 MVar and the power loss is 221.4346 kW and 150.1784 kVar. The load flow analysis on distribution use forward-backward sweep methodlogy. The simulation results show that the FACTS devices can improve the voltage stability on the redial distribution system.

Keywords: Radial Distribution Systems, FACTS, Optimal Allocation

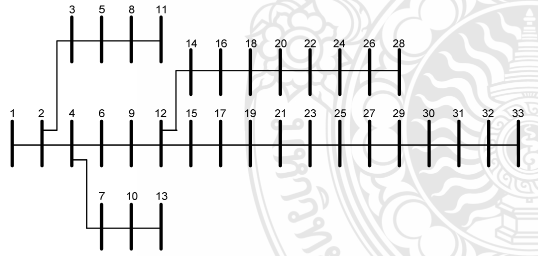
1. บทนำ

ปัจจุบันในประเทศไทยระบบการส่งกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายส่วนใหญ่เป็นระบบการต่อวงจรสายป้อนหลักแบบเรเดียล (Radial) ซึ่งหมายถึงการต่อกระจายออกเชิงรัศมี เป็นการจัดรูปแบบวงจรที่ง่ายและมีราคาต่ำที่สุด โดยจะเป็นการจ่ายไฟฟ้าออกจากสถานีไฟฟ้าย่อยเพื่อนำพลังงานไฟฟ้าไปจ่ายให้กับโหลด ซึ่งการต่อวงจรสายป้อนหลักแบบเรเดียลนี้ จะไม่มีการเชื่อมต่อกับสายป้อนที่มาจากสถานีย่อยอื่นๆ จึงเป็นข้อเสียกล่าวคือเมื่อเกิดฟอลต์ที่สายป้อนใดจะทำให้สายป้อนนั้นไฟดับทั้งหมด [1] ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังโหลดไม่มีความน่าเชื่อถือและไม่มีความยืดหยุ่นของระบบเท่าที่ควร เป็นผลให้การส่งกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายมีคุณภาพกำลังไฟฟ้าและเสถียรภาพกำลังไฟฟ้าที่ต่ำตามไปด้วย ระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยทั่วไปมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียมากกว่าระบบส่งจ่ายไฟฟ้าเนื่องจากเป็นระบบที่มีค่าอัตราส่วนระหว่างความต้านทานกับความต้านทานเหนี่ยวนำ (R/X Ratio) ค่อนข้างสูงทั้งยังเป็นระบบที่มีระดับแรงดันต่ำและมีกระแสไหลในสายมากกว่าระบบส่งจ่ายไฟฟ้า การปรับปรุงระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียนั้นมีหลายวิธี เช่น การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าในจุดที่มีความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าสูง [2] และการติดตั้งคาปาซิเตอร์เพื่อช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเข้าสู่ระบบ [3] ดังนั้นในบทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์หาตำแหน่งการติดตั้ง FACTS ที่เหมาะสมในระบบจำหน่าย เพื่อช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเข้าระบบและแก้ปัญหาเพาเวอร์แฟคเตอร์เป็นการแก้ปัญหาแรงดันตก ทำให้ระบบมีเสถียรภาพกำลังไฟฟ้าและความน่าเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ดียิ่งขึ้น

องค์ประกอบของการนำเสนอบทความนี้ประกอบด้วยลำดับแรกจะกล่าวถึงระบบจำหน่ายแบบเรเดียล การคำนวณการไหลของกำลัง ปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม อุปกรณ์ชดเชย FACTS สุดท้ายจะกล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะต่างๆ สำหรับงานวิจัยลำดับต่อไป

2. ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล (Radial Distribution Systems)

ระบบจำหน่ายแบบเรเดียลเป็นโครงข่ายระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ง่ายที่สุด ที่มีการจ่ายไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าผ่านสายจำหน่ายเพียงด้านเดียว โดยที่พลังงานไฟฟ้าจะไหลไปในทิศทางเดียวกันจากสถานีไฟฟ้าไปยังโหลดภาระการใช้งาน การวางแผนใช้ระบบจำหน่ายนี้หากมีโหลดผู้ใช้ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นในอนาคตก็สามารถที่จะเพิ่มระบบจำหน่ายแบบเรเดียลให้กลายเป็นระบบจำหน่ายแบบลูปได้ หรือระบบจำหน่ายแบบร่างแหต่อไปได้ ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียลนิยมใช้สำหรับจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าในพื้นที่ทั่วไปหรือในชนบท เนื่องจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าประเภทที่ลงทุนต่ำ มีการป้องกันระบบง่ายๆ และลักษณะของการวางสายแบบนี้สามารถเข้าใจได้ง่าย ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส 32 สาขา มีกำลังไฟฟ้ารวมของโหลดขนาด 3.72 MW. และ 2.3 MVar. แรกเริ่มกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่สูญเสียรวมในระบบขนาด 221.4346 kW. และ 150.1784 kVar. ในบทความนี้ระบบจำหน่ายทดสอบแบบเรเดียล 33 บัส 32 สาขา ใช้ Base MVA = 10 MVA. และ Base kV = 12.66 kV. บัสที่ 1 เป็นโหนดจ่ายที่เชื่อมต่อกับระบบส่งโดยผ่านสถานีย่อย การเชื่อมต่อโหนดสาขาจะเริ่มเชื่อมต่อจากบัสที่1 ไปยังบัสที่ 2 แล้วต่อไปยังโหนดสาขาอื่นๆต่อไป แผนภาพเส้นเดียวของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส 32 สาขา แสดงดังรูปที่ 1 [4]



รูปที่ 1. แผนภาพเส้นเดียวของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส 32 สาขา

3. การคำนวณการไหลของกำลัง

3.1 การคำนวณแรงดันแบบไปข้างหน้า (Voltage Forward Sweep):KVL

เริ่มต้นจากบัสอ้างอิง หรือรูตโหนด (Root node) หรือรูตบัส (Root bus) โดยที่ค่าแรงดันกำหนดให้มีค่าคงที่และเฟสเป็นศูนย์ ส่วนค่าแรงดันและมุมเฟสของแรงดันที่บัสอื่นๆ ถัดจากบัสอ้างอิงในรอบคำนวณที่ k จะถูกคำนวณค่าแรงดันที่บัส เรื่อยไปสู่บัสสุดท้ายด้วยสมการที่ (1)

$$V_{L2}^{(k)} = V_{L1}^{(k)} - Z_L J_L^{(k)} \tag{1}$$

เมื่อ Z_L ค่าอิมพีแดนซ์อนุกรมของสายส่งช่วง L ระหว่างโหนด L_2 และ L_1 L_2 เป็นโหนดปลายทาง L_1 เป็นโหนดต้นทาง J เป็นกระแสในสาย และ k เป็นรอบการคำนวณ

3.2 การคำนวณกระแสแบบย้อนกลับ (Current Backward Sweep): KCL

โดยจะเริ่มจากกระแสที่โหนดจะมีค่าดังสมการที่ (2)

$$I_i^{(k)} = \left(\frac{S_i}{V_i^{(k-1)}}\right)^* - Y_i V_i^{(k-1)} \tag{2}$$

เมื่อ S_i เป็นกำลังที่โหนด $i\left(S_i = P_i \pm jQ_i\right)$ Y_i เป็นผลรวมของแอตมิตแตนซ์ส่วนลงดินทั้งหมดที่โหนด i $V_i^{(k-1)}$ เป็นแรงดันที่โหนด i ณ รอบคำนวณที่ $k-1$ การคำนวณกระแสนี้จะเริ่มให้ขนาดแรงดันเป็น 1 p.u. และมุมแรงดันเป็นศูนย์ที่ทุกๆ โหนด ส่วนของการคำนวณกระแสในสายจะเริ่มจาก การคำนวณที่เรียกว่า การแพร่กระจายถอยหลัง โดยที่รอบคำนวณที่ k จะคำนวณกระแส J ในสายที่สุดท้ายเรื่อยเข้าสู่รูตโหนด หรือรูตบัส โดยกระแสที่สาย L หาได้จากสมการที่ (3)

$J_L^k = -I_{L2}^k + \sum$ (กระแสในสายที่พุ่งมาจากโหนด L_2) (3)

3.3 การเข้าสู่คำตอบของแรงดัน

จะทำในลักษณะเวียนซ้ำในแต่ละรอบการคำนวณจะตรวจสอบค่า mismatch ของแรงดันในแต่ละบัสดังแสดงในสมการที่ (4)

$$\Delta V_j^{(k)} = V_j^{(k)} - V_j^{(k-1)} \tag{4}$$

เมื่อ $\Delta V_j^{(k)}$ เป็นค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันที่พอยอมรับได้ mismatch ที่บัส j หลังจากการคำนวณในรอบที่ k $V_j^{(k)}$ เป็นแรงดันที่บัส j ในรอบการคำนวณที่ k และ $V_j^{(k-1)}$ เป็นแรงดันที่บัส j ในรอบการคำนวณที่ $k-1$ การเข้าสู่คำตอบของแรงดันอาจหาได้จากผลต่างของค่าอื่นๆดังสมการที่ (5)

$$\begin{Bmatrix} \left|\mathrm{Re}\left(\Delta V_j^{(k)}\right)\right| \le \varepsilon \\ \left|\mathrm{Im}\left(\Delta V_j^{(k)}\right)\right| \le \varepsilon \\ \left|\left(\Delta V_j^{(k)}\right)\right| \le \varepsilon \end{Bmatrix} \tag{5}$$

4. ปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าเหมาะสมที่สุด

4.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีหลายปัญหาที่นิยมนำมาพิจารณา เช่น การจ่ายโหลดอย่างประหยัด การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ ในบทความนี้ใช้การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งน้อยที่สุดเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งแสดงดังสมการที่ (6)

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^{N_L} g_{i,j}\left\{V_i^2 + V_j^2 - 2V_iV_j\cos\left(\delta_i - \delta_j\right)\right\} \tag{6}$$

โดยที่ P_{loss} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่สูญเสียในสายส่งทั้งหมด N_L คือ จำนวณสายส่งทั้งหมด V_i คือ ขนาดแรงดันบัสที่ i V_j คือ ขนาดแรงดันบัสที่ j δ_i คือ มุมแรงดันบัสที่ i δ_j คือ มุมแรงดันบัสที่ j และ $g_{i,j}$ คือ ความนำไฟฟ้าจากบัส i ไปยังบัส j

4.2 ระบบเงื่อนไขบังคับ

ตัวแปรปรับตั้งในบทความนี้คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากโรงจักรไฟฟ้า ขนาดแรงดันถูกควบคุมโดยสถานีไฟฟ้า แท็บหม้อแปลงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ โดยจะการปรับตั้งตัวแปรเหล่านี้เพื่อให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งน้อยที่สุด และยังคงอยู่ในช่วงขีดจำกัดของตัวแปรแต่ละตัว โดยมีตัวแปรที่ต้องการควบคุมตามคือ พิกัดการไหลกำลังไฟฟ้าของสายส่ง พิกัดช่วงขนาดแรงดันทุกบัสในระบบ เพื่อให้ระบบไฟฟ้าทำงานอยู่ในสภาวะปกติ ระบบเงื่อนไขบังคับทั้งเงื่อนไขสมการและอสมการแสดงดังต่อไปนี้

1) เงื่อนไขบังคับสมการเป็นสมการการไหลกำลังไฟฟ้า

$$P_{G,i} - P_{D,i} - \sum_{j=1}^{N_B}\left|V_i\right|\left|V_j\right|\left|Y_{i,j}\right|\cos\left(\theta_{i,j} - \delta_i + \delta_j\right) = 0 \tag{7}$$

$$Q_{G,i} - Q_{D,i} + \sum_{j=1}^{N_B}\left|V_i\right|\left|V_j\right|\left|Y_{i,j}\right|\sin\left(\theta_{i,j} - \delta_i + \delta_j\right) = 0 \tag{8}$$

โดยที่ $P_{G,i}$ คือ กำลังไฟฟ้าจริงผลิตที่บัส i $P_{D,i}$ คือ ความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส i $Q_{G,i}$ คือ กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟผลิตที่บัส i

$Q_{D,i}$ คือ ความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่บัส i N_B คือ จำนวณบัส

$\theta_{i,j}$ คือ มุมแอตมิตแตนซ์บัส i ไปยังบัส j และ $Y_{i,j}$ คือ ขนาดแอตมิตแตนซ์บัส i ไปยังบัส j

2) เงื่อนไขบังคับอสมการเป็นขอบเขตของตัวแปรที่ต้องการปรับตั้ง

$$V_i^{\min} \le V_i \le V_i^{\max} \tag{9}$$

$$T_i^{\min} \le T_i \le T_i^{\max} \tag{10}$$

$$P_{G,i}^{\min} \le P_{G,i} \le P_{G,i}^{\max} \tag{11}$$

$$Q_{comp,i}^{\min} \le Q_{comp,i} \le Q_{comp,i}^{\max} \tag{12}$$

โดยที่ $V_i^{\min}, V_i^{\max}$ คือ ขอบเขตแรงดันต่ำสุดและสูงสุด $T_i^{\min}, T_i^{\max}$ คือ ขอบเขตแท็ปหม้อแปลงต่ำสุดและสูงสุด $P_{G,i}^{\min}, P_{G,i}^{\max}$ คือ ขอบเขตของกำลังไฟฟ้าจริงต่ำสุดและสูงสุด และ $Q_{comp,i}^{\min}, Q_{comp,i}^{\max}$ คือ ขอบเขตกำลังไฟฟ้ารีแอคตีฟต่ำสุดและสูงสุด

ฟังก์ชันปรับโทษสามารถเขียนได้ตามสมการที่ (13)

$$P(x) = P_{loss} + X_P + X_Q + X_C + X_T + X_V + X_G \tag{13}$$

$$X_P = \rho\sum_{i=1}^{N_B}\left\{P_{G,i} - P_{D,i} - \sum_{j=1}^{N_B}\left|V_i\right|\left|V_j\right|\left|Y_{i,j}\right|\cos\left(\theta_{i,j} - \delta_i + \delta_j\right)\right\}^2 \tag{14}$$

$$X_Q = \rho\sum_{i=1}^{N_B}\left\{Q_{G,i} - Q_{D,i} + \sum_{j=1}^{N_B}\left|V_i\right|\left|V_j\right|\left|Y_{i,j}\right|\sin\left(\theta_{i,j} - \delta_i + \delta_j\right)\right\}^2 \tag{15}$$

$$X_C = \rho\sum_{i=1}^{N_C}\left\{\max\left(0, Q_{comp,i} - Q_{comp,i}^{\max}\right)\right\}^2 + \rho\sum_{i=1}^{N_C}\left\{\max\left(0, Q_{comp,i}^{\min} - Q_{comp,i}\right)\right\}^2 \tag{16}$$

$$X_T = \rho\sum_{i=1}^{N_T}\left\{\max\left(0, T_i - T_i^{\max}\right)\right\}^2 + \rho\sum_{i=1}^{N_T}\left\{\max\left(0, T_i^{\min} - T_i\right)\right\}^2 \tag{17}$$

$$X_V = \rho\sum_{i=1}^{N_B}\left\{\max\left(0, V_i - V_i^{\max}\right)\right\}^2$$

$$+\rho\sum_{i=1}^{N_B}\left\{\max\left(0,V_i^{\min}-V_i\right)\right\}^2 \qquad (18)$$

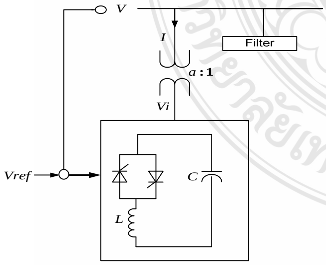
$$X_G=\rho\sum_{i=1}^{N_G}\left\{\max\left(0,P_{G,i}-P_{G,i}^{\max}\right)\right\}^2 + \rho\sum_{i=1}^{N_G}\left\{\max\left(0,P_{G,i}^{\min}-P_{G,i}\right)\right\}^2 \qquad (19)$$

เมื่อ N_G คือ จำนวณเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดในระบบ N_C คือ จำนวณตัวอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟในระบบ และ N_T คือ จำนวณของหม้อแปลงที่ติดตั้งในระบบ

5. อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น (FACTS)

5.1 Static VAR Compensator (SVC)

SVC ติดตั้งขนานกับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า รักษาแรงดันให้อยู่ในระดับคงที่หรือใกล้เคียง ภายใต้ภาวะการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆของโหลด แก้ไขการเปลี่ยนแปลงแรงดันเนื่องจากเหตุการณ์ที่ไม่พึงประสงค์ ปรับปรุงเสถียรภาพแรงดัน ณ จุดสำคัญ เช่น จุดกึ่งกลางของสายส่งระยะไกล ช่วยเหลือในการปรับปรุงแดมปิ้งของระบบ ช่วยปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ แก้ไขปัญหาเฟสไม่สมดุล สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ 1) ไทริสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์(TCR Thyristor Controlled Reactor) และตัวเหนี่ยวนำ จะใช้ไทริสเตอร์ควบคุมรีแอคเตอร์ และ 2)ไทริสเตอร์สวิตช์คาปาซิเตอร์(TSC Thyristor Switched Capacitor) และตัวเก็บประจุคงที่ (FC Fixed Capacitor) หรือเรียกย่อว่า TSC / FC ตัวเก็บประจุคงที่จะใช้การสวิตช์ทางกล ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของ SVC แสดงดังรูปที่ 2.



รูปที่ 2. ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของ SVC

1) รูปแบบการไหลกำลังไฟฟ้าด้วย SVC สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$P_{G,i}-P_{D,i}=V_i\sum_{j=1}^{N_B}V_j\left(G_i\cos\theta_{i,j}+B_{i,j}\sin\theta_{i,j}\right) \qquad (20)$$

$$Q_{G,i}+Q_{SVC,i}-Q_{D,i}=V_i\sum_{j=1}^{N_B}V_j\left(G_{i,j}\sin\theta_{i,j}-B_{i,j}\cos\theta_{i,j}\right) \qquad (21)$$

2) ขีดจำกัดเกี่ยวกับตัวแปรกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเขียนสมการได้ดังนี้

$$P_{G,i}^{\min}\le P_{G,i}\le P_{G,i}^{\max} \qquad ,i\in N_G \qquad (22)$$

$$Q_{G,i\min}\le Q_{G,i}\le Q_{G,i\max} \qquad ,i\in N_G \qquad (23)$$

$$Q_{SVCw\min}\le Q_{SVCw}\le Q_{SVCw\max} \quad ,w\in N_{SVC} \qquad (24)$$

$$V_{G,i\min}\le V_{G,i}\le V_{G,i\max} \qquad ,i\in N_G \qquad (25)$$

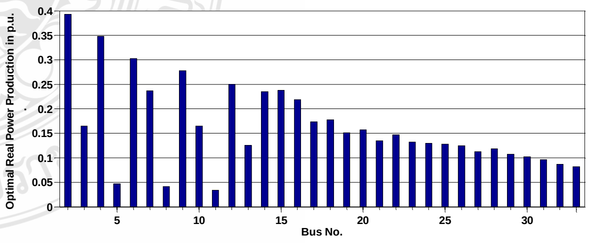
$$V_{D,k\min}\le V_{D,k}\le V_{D,k\max} \qquad ,k\in N_D \qquad (26)$$

$$T_{j\min}\le T_j\le T_{j\max} \qquad ,j\in N_T \qquad (27)$$

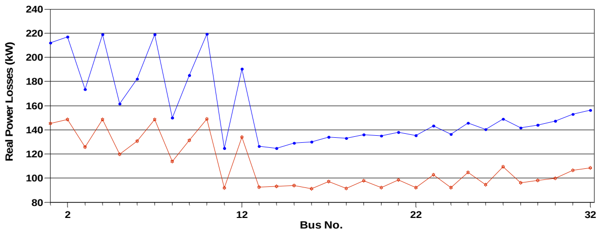
$$P_{i,j\min}\le P_{i,j}\le P_{i,j\max} \qquad ,i,j\in N_L \qquad (28)$$

โดยที่ $V_{D,k}$ คือ ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่โหลดบัส k Q_{SVCw} คือ กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเอาต์พุตของ $SVCw$ $P_{i,j}$ คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งบัส i ไปยังบัส j T คือ ตำแหน่งแท็ปหม้อแปลง θ คือ มุมของแรงดัน N_D คือ จำนวณของโหลดบัส และ N_{SVC} คือ จำนวณ SVC รวมทั้งหมด

6. ผลการจำลอง

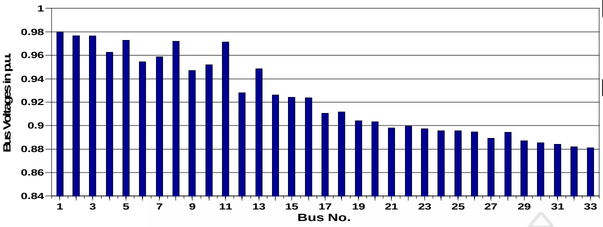


รูปที่ 3. ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่เหมาะสมของระบบจำหน่าย 33 บัส 32 สาขา

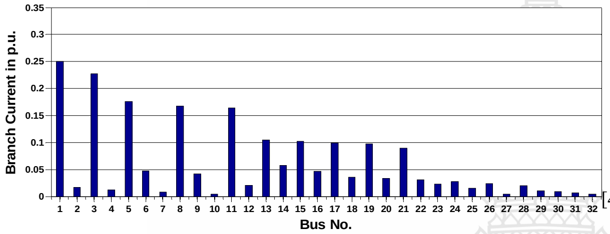


รูปที่ 4. ค่าโดยประมาณกับค่ากำลังไฟฟ้าจริงสูญเสียที่ต้องการของระบบ

จำหน่าย 33 บัส 32 สาขา



รูปที่ 5. ขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ของระบบจำหน่าย 33 บัส 32 สาขา



รูปที่ 6. ขนาดกระแสที่สาขาต่างๆของระบบจำหน่าย 33 บัส 32 สาขา

ผลการจำลองระบบมาตรฐานของ IEEE 33 บัส 32 สาขา ที่มีกำลังไฟฟ้ารวมของโหลดขนาด 3.72 MW. และ 2.3 MVar. แรกเริ่มกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่สูญเสียรวมในระบบขนาด 221.4346 kW. และ 150.1784 kVar. ใช้Base MVA = 10 MVA. และ Base kV = 12.66 kV ผลการจำลองค่าต่างๆ แสดงดังรูป

7. สรุป

บทความนี้นำเสนอการศึกษาการวิเคราะห์หาตำแหน่งการติดตั้ง FACTS ที่เหมาะสม โดยพิจารณาการทำงานของบัสที่ถูกติดตั้ง FACTS เข้าไปในระบบ การวิเคราะห์แบบจำลองของระบบจำหน่ายแบบเรเดียลใช้แบบจำลองมาตรฐานของ IEEE 33 บัส 32 สาขา ที่มีกำลังไฟฟ้ารวมของโหลดขนาด 3.72 MW. และ 2.3 MVar. แรกเริ่มกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่สูญเสียรวมในระบบขนาด 221.4346 kW. และ 150.1784 kVar. ใช้ Base MVA = 10 MVA. และ Base kV = 12.66 kV ผลการจำลองพบว่าขนาดแรงดันที่บัส 1 มีค่า 0.98 p.u ส่วนบัสอื่นๆที่อยู่ไกลออกไปแรงดันที่บัสจะค่อยๆลดลงเรื่อยๆ โดยเฉพาะที่ปลายสาย แต่หลังติดตั้ง FACTS เข้าไปในระบบพบว่าขนาดแรงดันที่บัสดีขึ้นมีค่าเข้าใกล้ 0.98 p.u. ระบบมีการจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่ดีขึ้นเพียงพอต่อความต้องการทำให้ระบบดีขึ้น นำผลที่ได้จากการจำลองระบบมาวิเคราะห์ปรับปรุง เพื่อพัฒนาและแก้ปัญหาเสถียรภาพแรงดันของระบบ

8. เอกสารอ้างอิง

[1] ชวลิต ดำรงรัตน์, "การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า", หจก.เอช-เอน การพิมพ์: บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด, 2533,หน้า 93-94.

[2] ยุทธนา เอี่ยมสมบูรณ์, "การหาตำแหน่งและขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายที่เหมาะสม เพื่อลดกำลังสูญเสียและเพิ่มความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายโดยวิธีค้นหาแบบตาบู", วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2550.

[3] ธวัช สิริสังกาส, "การหาตำแหน่งและขนาดติดตั้งคาปาซิเตอร์แบงค์ที่เหมาะสมเพื่อลดกำลัง สูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าพร้อมทั้งคำนึงถึงความไม่เป็นเชิงเส้นของโหลดโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาค", วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2550.

[4] P. Mahat, W. Ongsakul, and N. Mithulananthan, "Optimal placement of wind turbine DG in primary distribution systems for real loss reduction," Energy for Sustainable Development: Prospects and Issues for Asia (Electronic),2006, pp. 1-6.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นาย จักรินทร์ วิเศษยา
วัน เดือน ปี	28 พฤศจิกายน 2528
ที่อยู่	40 หมู่ 6 ต.หนองหญ้าปล้อง อ.วังสะพุง จ.เลย 42130
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาอิเล็กทรนิกส์และงานโทรคมนาคม จากวิทยาลัยนิคเลย เมื่อ พ.ศ. 2549 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง จากมหาวิทยาลัยสยาม เมื่อ พ.ศ. 2552

ประวัติการทำงาน

พ.ศ. 2553-ปัจจุบัน	พนักงานและผู้ช่วยนักวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

จักรินทร์ วิเศษยา, และกฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์, "การศึกษาการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้โปรแกรม PSAT", **การประชุมการประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 3**, ศูนย์ประชุมสถาบันวิจัยจุฬาภรณ์, ระหว่างวันที่ 24-26 พฤศจิกายน 2553, กรุงเทพฯ

จักรินทร์ วิเศษยา, และกฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์, "การวิเคราะห์หาตำแหน่งการติดตั้ง FACTS ที่เหมาะสมในระบบจำหน่าย", **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 3**, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ, ระหว่างวันที่ 9-11 มีนาคม 2554, นนทบุรี